

Et lokalsøgningssystem til at løse diskrete optimeringsproblemer

Bo Stentebjerg-Hansen

Vejleder: Marco Chiarandini

Syddansk Universitet

Institut for Matematik og Datalogi

3. marts 2016

Overblik

- 1 Introduktion
- 2 Lokalsøgnings elementer
- 3 Opbygning af systemet
- 4 Lokalsøgningsalgoritmer
- 5 Eksperimentel evaluering
- 6 Sidste kommentarer

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p
består af:

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p
består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p
består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p
består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p
består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

$$\min\{ f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \text{feas}(p) \}$$

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

$$\min\{ f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \text{feas}(p) \}$$

Eksempel: Skemalægningsinstans

Kan være NP-hårde problemer

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

$$\min\{ f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \text{feas}(p) \}$$

Kan være NP-hårde problemer

Eksempel: Skemalægningsinstans

- Variable: Klasser der skal skemalægges

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

$$\min\{ f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \text{feas}(p) \}$$

Kan være NP-hårde problemer

Eksempel: Skemalægningsinstans

- Variable: Klasser der skal skemalægges
- Betingelser: Ingen overlap, krav til lokaler, tidspunkter, osv

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

$$\min\{ f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \text{feas}(p) \}$$

Kan være NP-hårde problemer

Eksempel: Skemalægningsinstans

- Variable: Klasser der skal skemalægges
- Betingelser: Ingen overlap, krav til lokaler, tidspunkter, osv
- Evaluering: Totale antal af mellemtimer

Diskrete optimeringsproblemer

En diskret optimeringsproblem p består af:

- n variable \mathbf{x} , $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^n$
- m betingelser \mathbf{C}
- Evaluerings funktion $f(\mathbf{x})$

$$\min\{ f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \text{feas}(p) \}$$

Kan være NP-hårde problemer

Eksempel: Skemalægningsinstans

- Variable: Klasser der skal skemalægges
- Betingelser: Ingen overlap, krav til lokaler, tidspunkter, osv
- Evaluering: Totale antal af mellemtimer
- Bedste løsning: Den løsning som overholder alle betingelser og giver færrest mellemtimer

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer
 - Approximations algoritmer

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer
 - Approximations algoritmer
 - Dynamisk programmering

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer
 - Approximations algoritmer
 - Dynamisk programmering
- ...
- Satisfiability encoding

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer
 - Approximations algoritmer
 - Dynamisk programmering
- ...
- Satisfiability encoding
- Lineær heltalsprogrammering

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer
 - Approximations algoritmer
 - Dynamisk programmering
- ...
- Satisfiability encoding
- Lineær heltalsprogrammering
- Constraint Programming

Løsningsmetoder

- Algoritmer til specifikke problemer
 - Approximations algoritmer
 - Dynamisk programmering
- ...
- Satisfiability encoding
- Lineær heltalsprogrammering
- Constraint Programming
- Lokalsøgning
- ...

Lineær heltalsprogrammering

- Model baseret på uligheder

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\
 \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\
 & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 & x_1, x_2, x_3 \in \mathbb{Z}^+
 \end{array}$$

Lineær heltalsprogrammering

- Model baseret på uligheder

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\
 \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\
 & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 & x_1, x_2, x_3 \in \mathbb{Z}^+
 \end{array}$$

- Gurobi, CPLEX, SCIP, GLPK

Lineær heltalsprogrammering

- Model baseret på uligheder

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\
 \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\
 & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 & x_1, x_2, x_3 \in \mathbb{Z}^+
 \end{array}$$

- Gurobi, CPLEX, SCIP, GLPK
- Kan ikke altid finde en (optimal) løsning inden for rimelig tid

Lineær heltalsprogrammering

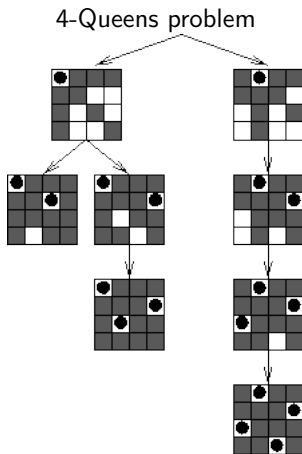
- Model baseret på uligheder

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\
 \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\
 & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\
 & x_1, x_2, x_3 \in \mathbb{Z}^+
 \end{array}$$

- Gurobi, CPLEX, SCIP, GLPK
- Kan ikke altid finde en (optimal) løsning inden for rimelig tid
- Kan garantere at en løsning er optimal

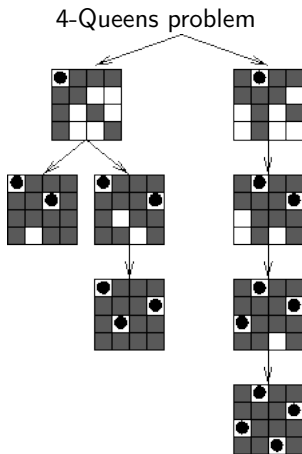
Constraint Programming (CP)

- Bruger søgetræer + propagation til at finde en løsning



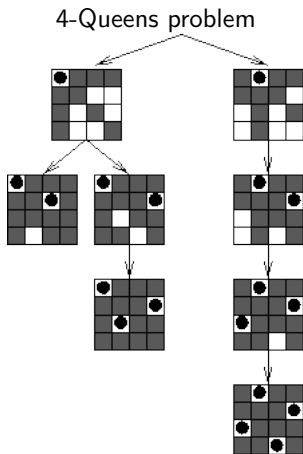
Constraint Programming (CP)

- Bruger søgetræer + propagation til at finde en løsning
- Mere naturlig formulering af problemer



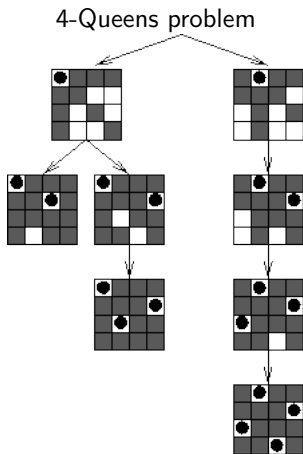
Constraint Programming (CP)

- Bruger søgetræer + propagation til at finde en løsning
- Mere naturlig formulering af problemer
- Flere muligheder for at modellere et problem



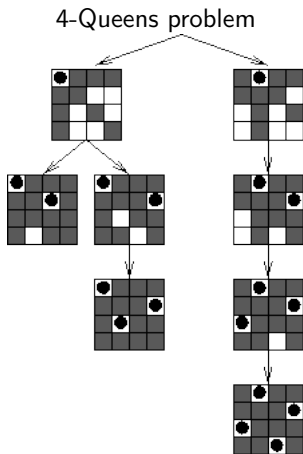
Constraint Programming (CP)

- Bruger søgetræer + propagation til at finde en løsning
- Mere naturlig formulering af problemer
- Flere muligheder for at modellere et problem
- Men mindre egnet til optimeringsproblemer



Constraint Programming (CP)

- Bruger søgetræer + propagation til at finde en løsning
- Mere naturlig formulering af problemer
- Flere muligheder for at modellere et problem
- Men mindre egnet til optimeringsproblemer
- Fx Gecode, CHIP, Prolog, ...



Lokalsøgning

- “Trial and error” teknik

2	6	3	7	8	9	4	1	5		6	8	4	7	3	5	1	2	9		
5	8	9	4	1	3	7	6	2		5	1	2	4	6	9	3	7	8		
1	4	7	2	5	6	8	9	3		7	9	3	2	1	8	4	5	6		
7	9	8	6	2	1	5	3	4		4	2	5	9	7	6	8	1	3		
4	5	1	8	3	7	9	2	6		8	3	1	5	2	4	9	6	7		
6	3	2	5	9	4	1	8	7		9	7	6	1	8	3	2	4	5		
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6	8	2
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7	9	1
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5	3	4
						7	6	2	4	9	3	5	8	1						
						1	8	3	7	6	5	9	2	4						
						5	9	4	1	2	8	6	7	3						
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6	7	9
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3	4	5
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1	2	8
4	6	2	5	3	7	1	9	8		6	4	1	8	5	7	2	9	3		
7	5	3	9	1	8	6	4	2		5	2	8	3	9	1	4	6	7		
8	9	1	4	6	2	5	7	3		3	7	9	2	4	6	5	8	1		
2	1	4	6	7	5	3	8	9		1	5	7	9	6	2	8	3	4		
5	3	7	8	9	1	2	6	4		2	8	4	7	1	3	9	5	6		
9	8	6	2	4	3	7	5	1		9	6	3	4	8	5	7	1	2		

Lokalsøgning

- “Trial and error” teknik
- Alle variable skal have en værdi først

2	6	3	7	8	9	4	1	5		6	8	4	7	3	5	1	2	9		
5	8	9	4	1	3	7	6	2		5	1	2	4	6	9	3	7	8		
1	4	7	2	5	6	8	9	3		7	9	3	2	1	8	4	5	6		
7	9	8	6	2	1	5	3	4		4	2	5	9	7	6	8	1	3		
4	5	1	8	3	7	9	2	6		8	3	1	5	2	4	9	6	7		
6	3	2	5	9	4	1	8	7		9	7	6	1	8	3	2	4	5		
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6	8	2
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7	9	1
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5	3	4
						7	6	2	4	9	3	5	8	1						
						1	8	3	7	6	5	9	2	4						
						5	9	4	1	2	8	6	7	3						
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6	7	9
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3	4	5
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1	2	8
4	6	2	5	3	7	1	9	8		6	4	1	8	5	7	2	9	3		
7	5	3	9	1	8	6	4	2		5	2	8	3	9	1	4	6	7		
8	9	1	4	6	2	5	7	3		3	7	9	2	4	6	5	8	1		
2	1	4	6	7	5	3	8	9		1	5	7	9	6	2	8	3	4		
5	3	7	8	9	1	2	6	4		2	8	4	7	1	3	9	5	6		
9	8	6	2	4	3	7	5	1		9	6	3	4	8	5	7	1	2		

Lokalsøgning

- “Trial and error” teknik
- Alle variable skal have en værdi først
- Delt op implicitte og bløde betingelser

2	6	3	7	8	9	4	1	5		6	8	4	7	3	5	1	2	9		
5	8	9	4	1	3	7	6	2		5	1	2	4	6	9	3	7	8		
1	4	7	2	5	6	8	9	3		7	9	3	2	1	8	4	5	6		
7	9	8	6	2	1	5	3	4		4	2	5	9	7	6	8	1	3		
4	5	1	8	3	7	9	2	6		8	3	1	5	2	4	9	6	7		
6	3	2	5	9	4	1	8	7		9	7	6	1	8	3	2	4	5		
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6	8	2
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7	9	1
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5	3	4
						7	6	2	4	9	3	5	8	1						
						1	8	3	7	6	5	9	2	4						
						5	9	4	1	2	8	6	7	3						
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6	7	9
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3	4	5
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1	2	8
4	6	2	5	3	7	1	9	8		6	4	1	8	5	7	2	9	3		
7	5	3	9	1	8	6	4	2		5	2	8	3	9	1	4	6	7		
8	9	1	4	6	2	5	7	3		3	7	9	2	4	6	5	8	1		
2	1	4	6	7	5	3	8	9		1	5	7	9	6	2	8	3	4		
5	3	7	8	9	1	2	6	4		2	8	4	7	1	3	9	5	6		
9	8	6	2	4	3	7	5	1		9	6	3	4	8	5	7	1	2		

Lokalsøgning

- “Trial and error” teknik
- Alle variable skal have en værdi først
- Delt op implicitte og bløde betingelser
- Ændre få variable ad gangen og beregner effekten

2	6	3	7	8	9	4	1	5				6	8	4	7	3	5	1	2	9
5	8	9	4	1	3	7	6	2				5	1	2	4	6	9	3	7	8
1	4	7	2	5	6	8	9	3				7	9	3	2	1	8	4	5	6
7	9	8	6	2	1	5	3	4				4	2	5	9	7	6	8	1	3
4	5	1	8	3	7	9	2	6				8	3	1	5	2	4	9	6	7
6	3	2	5	9	4	1	8	7				9	7	6	1	8	3	2	4	5
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6	8	2
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7	9	1
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5	3	4
						7	6	2	4	9	3	5	8	1						
						1	8	3	7	6	5	9	2	4						
						5	9	4	1	2	8	6	7	3						
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6	7	9
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3	4	5
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1	2	8
4	6	2	5	3	7	1	9	8				6	4	1	8	5	7	2	9	3
7	5	3	9	1	8	6	4	2				5	2	8	3	9	1	4	6	7
8	9	1	4	6	2	5	7	3				3	7	9	2	4	6	5	8	1
2	1	4	6	7	5	3	8	9				1	5	7	9	6	2	8	3	4
5	3	7	8	9	1	2	6	4				2	8	4	7	1	3	9	5	6
9	8	6	2	4	3	7	5	1				9	6	3	4	8	5	7	1	2

Lokalsøgning

- “Trial and error” teknik
- Alle variable skal have en værdi først
- Delt op implicitte og bløde betingelser
- Ændre få variable ad gangen og beregner effekten
- Kan ikke garantere optimalitet

2	6	3	7	8	9	4	1	5		6	8	4	7	3	5	1	2	9
5	8	9	4	1	3	7	6	2		5	1	2	4	6	9	3	7	8
1	4	7	2	5	6	8	9	3		7	9	3	2	1	8	4	5	6
7	9	8	6	2	1	5	3	4		4	2	5	9	7	6	8	1	3
4	5	1	8	3	7	9	2	6		8	3	1	5	2	4	9	6	7
6	3	2	5	9	4	1	8	7		9	7	6	1	8	3	2	4	5
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5
									7	6	2	4	9	3	5	8	1	
									1	8	3	7	6	5	9	2	4	
									5	9	4	1	2	8	6	7	3	
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1
4	6	2	5	3	7	1	9	8				6	4	1	8	5	7	2
7	5	3	9	1	8	6	4	2				5	2	8	3	9	1	4
8	9	1	4	6	2	5	7	3				3	7	9	2	4	6	5
2	1	4	6	7	5	3	8	9				1	5	7	9	6	2	8
5	3	7	8	9	1	2	6	4				2	8	4	7	1	3	9
9	8	6	2	4	3	7	5	1				9	6	3	4	8	5	7

Lokalsøgning

- “Trial and error” teknik
- Alle variable skal have en værdi først
- Delt op implicitte og bløde betingelser
- Ændre få variable ad gangen og beregner effekten
- Kan ikke garantere optimalitet
- Ofte implementeret forfra til specifikke problemer

2	6	3	7	8	9	4	1	5		6	8	4	7	3	5	1	2	9		
5	8	9	4	1	3	7	6	2		5	1	2	4	6	9	3	7	8		
1	4	7	2	5	6	8	9	3		7	9	3	2	1	8	4	5	6		
7	9	8	6	2	1	5	3	4		4	2	5	9	7	6	8	1	3		
4	5	1	8	3	7	9	2	6		8	3	1	5	2	4	9	6	7		
6	3	2	5	9	4	1	8	7		9	7	6	1	8	3	2	4	5		
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6	8	2
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7	9	1
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5	3	4
						7	6	2	4	9	3	5	8	1						
						1	8	3	7	6	5	9	2	4						
						5	9	4	1	2	8	6	7	3						
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6	7	9
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3	4	5
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1	2	8
4	6	2	5	3	7	1	9	8		6	4	1	8	5	7	2	9	3		
7	5	3	9	1	8	6	4	2		5	2	8	3	9	1	4	6	7		
8	9	1	4	6	2	5	7	3		3	7	9	2	4	6	5	8	1		
2	1	4	6	7	5	3	8	9		1	5	7	9	6	2	8	3	4		
5	3	7	8	9	1	2	6	4		2	8	4	7	1	3	9	5	6		
9	8	6	2	4	3	7	5	1		9	6	3	4	8	5	7	1	2		

Lokalsøgning

- "Trial and error" teknik
- Alle variable skal have en værdi først
- Delt op implicitte og bløde betingelser
- Ændre få variable ad gangen og beregner effekten
- Kan ikke garantere optimalitet
- Ofte implementeret forfra til specifikke problemer
- General Purpose lokalsøgningssystemer

2	6	3	7	8	9	4	1	5				6	8	4	7	3	5	1	2	9
5	8	9	4	1	3	7	6	2				5	1	2	4	6	9	3	7	8
1	4	7	2	5	6	8	9	3				7	9	3	2	1	8	4	5	6
7	9	8	6	2	1	5	3	4				4	2	5	9	7	6	8	1	3
4	5	1	8	3	7	9	2	6				8	3	1	5	2	4	9	6	7
6	3	2	5	9	4	1	8	7				9	7	6	1	8	3	2	4	5
3	1	5	9	4	2	6	7	8	2	3	4	1	5	9	3	4	7	6	8	2
9	7	4	3	6	8	2	5	1	6	7	9	3	4	8	6	5	2	7	9	1
8	2	6	1	7	5	3	4	9	5	8	1	2	6	7	8	9	1	5	3	4
						7	6	2	4	9	3	5	8	1						
						1	8	3	7	6	5	9	2	4						
						5	9	4	1	2	8	6	7	3						
1	2	5	7	8	9	4	3	6	9	5	7	8	1	2	5	3	4	6	7	9
6	7	9	3	2	4	8	1	5	3	4	2	7	9	6	1	2	8	3	4	5
3	4	8	1	5	6	9	2	7	8	1	6	4	3	5	6	7	9	1	2	8
4	6	2	5	3	7	1	9	8				6	4	1	8	5	7	2	9	3
7	5	3	9	1	8	6	4	2				5	2	8	3	9	1	4	6	7
8	9	1	4	6	2	5	7	3				3	7	9	2	4	6	5	8	1
2	1	4	6	7	5	3	8	9				1	5	7	9	6	2	8	3	4
5	3	7	8	9	1	2	6	4				2	8	4	7	1	3	9	5	6
9	8	6	2	4	3	7	5	1				9	6	3	4	8	5	7	1	2

General purpose lokalsøgningsystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

General purpose lokalsøgningsystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]
 - Lokalsøgningsalgoritmer implementeret

General purpose lokalsøgningsystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]
 - Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
 - Bruger definere hvilke der skal bruges

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

General purpose lokalsøgningsystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]
 - Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
 - Bruger definere hvilke der skal bruges
 - Hotspots skal implementeres af bruger
- 2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

General purpose lokalsøgningssystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]
 - Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
 - Bruger definere hvilke der skal bruges
 - Hotspots skal implementeres af bruger
- 2 Comet [Van Hentenryck & Michel]
 - Først betingelsesbaseret lokalsøgningssystem

General purpose lokalsøgningssystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]
 - Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
 - Bruger definere hvilke der skal bruges
 - Hotspots skal implementeres af bruger
- 2 Comet [Van Hentenryck & Michel]
 - Først betingelsesbaseret lokalsøgningssystem
 - Mulighed for udvidelse

General purpose lokalsøgningssystemer

- 1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]
 - Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
 - Bruger definere hvilke der skal bruges
 - Hotspots skal implementeres af bruger
- 2 Comet [Van Hentenryck & Michel]
 - Først betingelsesbaseret lokalsøgningssystem
 - Mulighed for udvidelse
 - Ikke længere vedligeholdt

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningsystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningsystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

- Matematisk modellering

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningsystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

- Matematisk modellering
- Lineær- og heltalsprogrammering

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningsystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

- Matematisk modellering
- Lineær- og heltalsprogrammering
- Kommerciel Solver

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningsystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

- Matematisk modellering
- Lineær- og heltalsprogrammering
- Kommerciel Solver

4 OscaR [R. Landtsheer]

General purpose lokalsøgningsystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningsystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

- Matematisk modellering
- Lineær- og heltalsprogrammering
- Kommerciel Solver

4 OscaR [R. Landtsheer]

- Inspireret af Comet

General purpose lokalsøgningssystemer

1 EasyLocal++ [L. Gaspero & A. Schaerf]

- Lokalsøgningsalgoritmer implementeret
- Bruger definere hvilke der skal bruges
- Hotspots skal implementeres af bruger

2 Comet [Van Hentenryck & Michel]

- Først betingelsesbaseret lokalsøgningssystem
- Mulighed for udvidelse
- Ikke længere vedligeholdt

3 LocalSolver [Innovation 24]

- Matematisk modellering
- Lineær- og heltalsprogrammering
- Kommerciel Solver

4 OsaR [R. Landtsheer]

- Inspireret af Comet
- Forholdsvis nyt

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:
 - Ikke som “large scale neighborhood search” [P. Shaw] ¹

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:
 - Ikke som “large scale neighborhood search” [P. Shaw]¹
- Undersøger effekten af (offline) CP domæne reducering og variable fiksering

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:
 - Ikke som “large scale neighborhood search” [P. Shaw]¹
- Undersøger effekten af (offline) CP domæne reducering og variable fiksering
- Bruger CP som konstruktions heuristik

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:
 - Ikke som “large scale neighborhood search” [P. Shaw] ¹
- Undersøger effekten af (offline) CP domæne reducering og variable fiksering
- Bruger CP som konstruktions heuristik
- Tester effekten af envejsbetingelser

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:
 - Ikke som “large scale neighborhood search” [P. Shaw] ¹
- Undersøger effekten af (offline) CP domæne reducering og variable fiksering
- Bruger CP som konstruktions heuristik
- Tester effekten af envejsbetingelser
- Undersøger en ny evalueringsmetode i lokalsøgning

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

Hvorfor et andet lokalsøgningssystem?

- Kombinerer CP og lokalsøgning på en ny måde:
 - Ikke som “large scale neighborhood search” [P. Shaw] ¹
- Undersøger effekten af (offline) CP domæne reducering og variable fiksering
- Bruger CP som konstruktions heuristik
- Tester effekten af envejsbetingelser
- Undersøger en ny evalueringsmetode i lokalsøgning
 - Leksikografisk vægtning

¹Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems

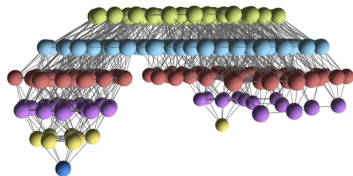
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

Begreber i lokalsøgning

Modellering:

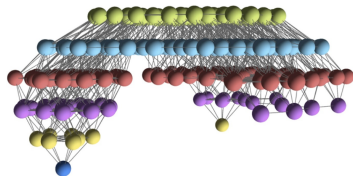
- Variable: search space $S(p)$,
løsningsrepræsentation



Begreber i lokalsøgning

Modellering:

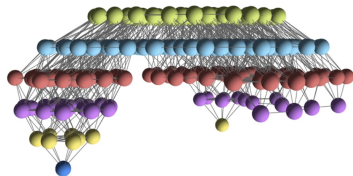
- Variable: search space $S(p)$,
løsningsrepræsentation
- Betingelser:



Begreber i lokalsøgning

Modellering:

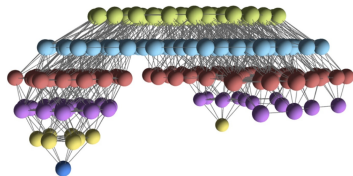
- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser



Begreber i lokalsøgning

Modellering:

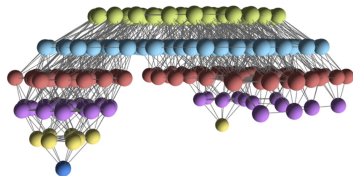
- Variable: search space $S(p)$,
løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser



Begreber i lokalsøgning

Modellering:

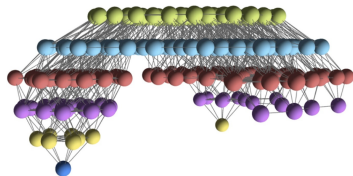
- Variable: search space $S(p)$,
løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser



Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

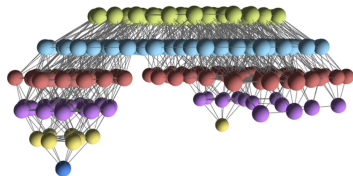


Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:



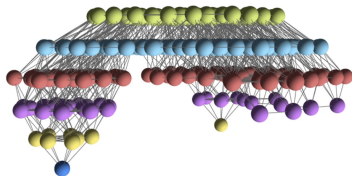
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood



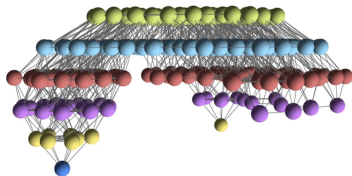
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood



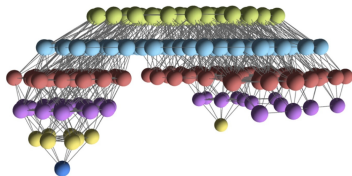
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood
- Lokalsøgning



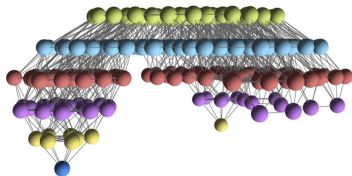
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood
- Lokalsøgning
- Metaheuristikker



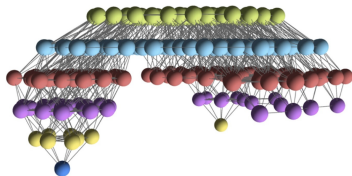
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood
- Lokalsøgning
- Metaheuristikker
 - Tabu søgning



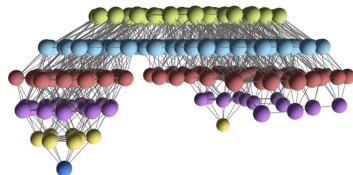
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood
- Lokalsøgning
- Metaheuristikker
 - Tabu søgning
 - Iterativ lokalsøgning



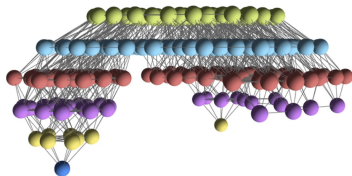
Begreber i lokalsøgning

Modellering:

- Variable: search space $S(p)$, løsningsrepræsentation
- Betingelser:
 - Implicitte betingelser
 - Envejsbetingelser
 - Bløde betingelser
- Evaluerings funktion: kvaliteten af en løsning

Søgning:

- (Konstruktions heuristik)
- Neighborhood
- Lokalsøgning
- Metaheuristikker
 - Tabu søgning
 - Iterativ lokalsøgning
 - ...



Binære optimeringsproblemer

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n c_j x_j \mid \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_j, \forall i \in \{1..m\} \right\}$$

Binære optimeringsproblemer

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n c_j x_j \mid \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_j, \forall i \in \{1..m\} \right\}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\ \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\ & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\ & x_1, x_2, x_3 \in \{0, 1\} \end{array}$$

Binære optimeringsproblemer

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n c_j x_j \mid \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_j, \forall i \in \{1..m\} \right\}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\ \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\ & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\ & x_1, x_2, x_3 \in \{0, 1\} \end{array}$$

- Mange problemer kan modelleres som binære optimeringsproblemer

Binære optimeringsproblemer

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n c_j x_j \mid \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_j, \forall i \in \{1..m\} \right\}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\ \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\ & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\ & x_1, x_2, x_3 \in \{0, 1\} \end{array}$$

- Mange problemer kan modelleres som binære optimeringsproblemer
- Fx: traveling salesman problem, knapsack, vertex cover, ...

Binære optimeringsproblemer

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^n c_j x_j \mid \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_j, \forall i \in \{1..m\} \right\}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & z = 2x_1 + x_2 + x_3 \\ \text{subject to} & -x_1 + 2x_2 \leq 1 \\ & x_1 + x_2 + x_3 = 2 \\ & x_1, x_2, x_3 \in \{0, 1\} \end{array}$$

- Mange problemer kan modelleres som binære optimeringsproblemer
- Fx: traveling salesman problem, knapsack, vertex cover, ...

Bliver oprettet i dette system med **linear**:

linear(*int*[] coefficients, *Variable*[] variables, *int* relation, *int* bound, *int* priority)

Før lokalsøgning kan startes

Find en startløsning:

- Opret variable og begrænsninger

Før lokalsøgning kan startes

Find en startløsning:

- Opret variable og begrænsninger
- Domæne reducering lavet af Gecode

Før lokalsøgning kan startes

Find en startløsning:

- Opret variable og begrænsninger
- Domæne reducering lavet af Gecode
- Oprettelse af søgningsstrategi til Gecode

Før lokalsøgning kan startes

Find en startløsning:

- Opret variable og begrænsninger
- Domæne reducering lavet af Gecode
- Oprettelse af søgningsstrategi til Gecode
- Find en gyldig løsning

Før lokalsøgning kan startes

Find en startløsning:

- Opret variable og begrænsninger
- Domæne reducere lavet af Gecode
- Oprettelse af søgningsstrategi til Gecode
- Find en gyldig løsning
 - til 100 % af betingelserne
 - til 50 % af betingelserne
 - til 25 % af betingelserne
 - Tilfældig tildeling af værdi til variable inden for deres domæne

Behandling af betingelser:

Behandling af betingelser:

- 1 Invarianter: Variable defineret af betingelser

Behandling af betingelser:

- 1 Invarianter: Variable defineret af betingelser
- 2 Graf over afhængighed mellem variable og invarianter

Behandling af betingelser:

- 1 Invarianter: Variable defineret af betingelser
- 2 Graf over afhængighed mellem variable og invarianter
- 3 Auxiliary invarianter: Betingelser behandlet som invarianter

Behandling af betingelser:

- 1 Invarianter: Variable defineret af betingelser
- 2 Graf over afhængighed mellem variable og invarianter
- 3 Auxiliary invarianter: Betingelser behandlet som invarianter
- 4 Topologisk sortering af invarianter.

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$

x_1



x_2



x_3



x_4



x_5

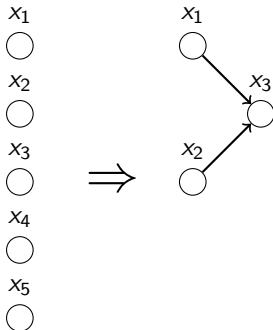


(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$

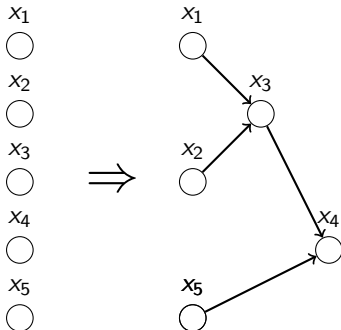


(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$



(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$

x_1



x_2



x_3



x_4



x_5



x_1



y_1



x_2



y_2



x_5



- x_3 er gjort afhængig af x_1 og x_2

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$

 x_1  x_2  x_3  x_4  x_5  x_1  y_1  x_2  y_2  x_5 

- x_3 er gjort afhængig af x_1 og x_2

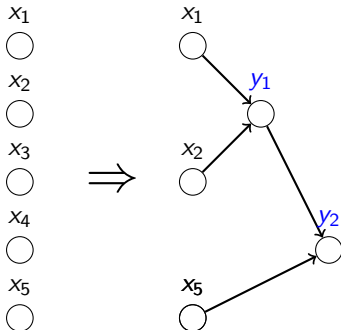
- x_4 indirekte afhængig af x_1 og x_2

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$



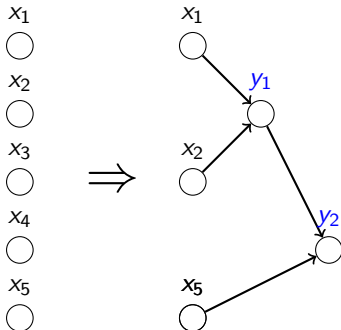
- x_3 er gjort afhængig af x_1 og x_2
- x_4 indirekte afhængig af x_1 og x_2
- Variable valgt efter antal udgående kanter og antallet af betingelser den optræder i

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$



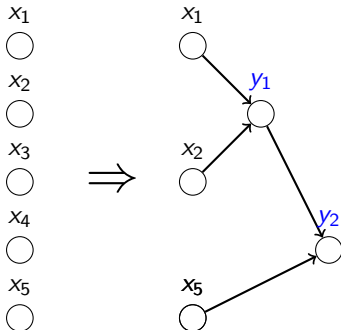
- x_3 er gjort afhængig af x_1 og x_2
- x_4 indirekte afhængig af x_1 og x_2
- Variable valgt efter antal udgående kanter og antallet af betingelser den optræder i
- Færre mulige løsninger der skal undersøges

(1) Invarianter og afhængighedsgraf

- Betingelses bestemt om envejsbetingelse kan laves

$$x_1 + x_2 - x_3 = 1 \Leftrightarrow x_3 = x_1 + x_2 - 1$$

$$x_3 - x_4 + x_5 = 1 \Leftrightarrow x_4 = x_3 + x_5 - 1$$



- x_3 er gjort afhængig af x_1 og x_2
- x_4 indirekte afhængig af x_1 og x_2
- Variable valgt efter antal udgående kanter og antallet af betingelser den optræder i
- Færre mulige løsninger der skal undersøges
- Bruger lidt mere tid på at evaluere en løsning

(2) Kredse i grafen

(2) Kredse i grafen

$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$

(2) Kredse i grafen

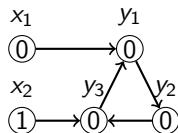
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



(2) Kredse i grafen

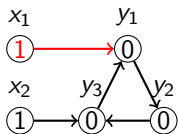
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



(2) Kredse i grafen

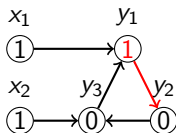
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



(2) Kredse i grafen

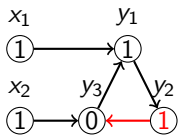
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



(2) Kredse i grafen

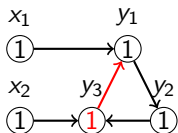
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



(2) Kredse i grafen

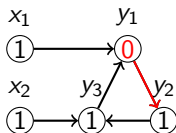
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



(2) Kredse i grafen

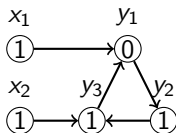
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$

(2) Kredse i grafen

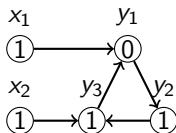
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)

(2) Kredse i grafen

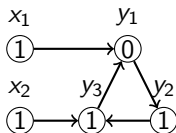
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)
 - Fjerne en invariant \rightarrow genskaber en variable fra hver SCC

(2) Kredse i grafen

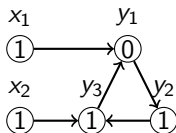
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)
 - Fjerne en invariant \rightarrow genskaber en variable fra hver SCC
 - Vælger invariant efter antal indgående kanter

(2) Kredse i grafen

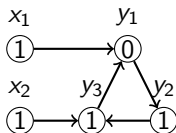
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)
 - Fjerne en invariant \rightarrow genskaber en variable fra hver SCC
 - Vælger invariant efter antal indgående kanter
- Gentages indtil ingen stærke sammenhængskomponenter er fundet

(2) Kredse i grafen

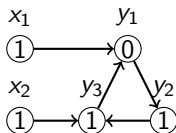
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)
 - Fjerne en invariant \rightarrow genskaber en variable fra hver SCC
 - Vælger invariant efter antal indgående kanter
- Gentages indtil ingen stærke sammenhængskomponenter er fundet
- Balance mellem tid og effekt

(2) Kredse i grafen

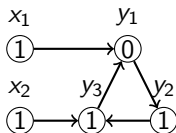
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$y_2 = y_1$$

$$y_3 = x_2 + y_2 - 1$$

$$x_1, x_2 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_2, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)
 - Fjerne en invariant \rightarrow genskaber en variable fra hver SCC
 - Vælger invariant efter antal indgående kanter
- Gentages indtil ingen stærke sammenhængskomponenter er fundet
- Balance mellem tid og effekt

(2) Kredse i grafen

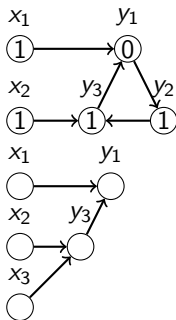
$$y_1 = x_1 - y_3$$

$$x_3 - y_1 = 0$$

$$y_3 = x_2 + x_3 - 1$$

$$x_1, x_2, x_3 \in \{0, 1\}$$

$$y_1, y_3 \in \{0, 1\}$$



Identificering af kredse:

- Dybde først lignende algoritme, af Tarjan $O(V + E)$
 - Finder stærke sammenhængskomponenter (SCC)
 - Fjerne en invariant \rightarrow genskaber en variable fra hver SCC
 - Vælger invariant efter antal indgående kanter
- Gentages indtil ingen stærke sammenhængskomponenter er fundet
- Balance mellem tid og effekt

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

- Overtrædelse af betingelsen:

$$\underbrace{w_1}_{w_2} \leq 2$$

$$w_2 = \begin{cases} w_1 - 2, & \text{if } w_1 > 2. \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

- Overtrædelse af betingelsen:

$$\underbrace{w_1}_{w_2} \leq 2$$

$$w_2 = \begin{cases} w_1 - 2, & \text{if } w_1 > 2. \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

- Overtrædelse af betingelsen:

$$\underbrace{w_1}_{w_2} \leq 2$$

$$w_2 = \begin{cases} w_1 - 2, & \text{if } w_1 > 2. \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- Betingelser som ikke er brugt til at definere variable

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

- Overtrædelse af betingelsen:

$$\underbrace{w_1}_{w_2} \leq 2$$

$$w_2 = \begin{cases} w_1 - 2, & \text{if } w_1 > 2. \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- Betingelser som ikke er brugt til at definere variable
- Betingelses specifik oprettelse af invarianter

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

- Overtrædelse af betingelsen:

$$\underbrace{w_1}_{w_2} \leq 2$$

$$w_2 = \begin{cases} w_1 - 2, & \text{if } w_1 > 2. \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- Betingelser som ikke er brugt til at definere variable
- Betingelses specifik oprettelse af invarianter
- Tilføj invarianter til grafen

(3) Yderligere invarianter

For en **linear** betingelsen:

- Summering af venstresiden:

$$\underbrace{x_1 + 2x_2 - x_3}_{w_1} \leq 2$$

- Overtrædelse af betingelsen:

$$\underbrace{w_1}_{w_2} \leq 2$$

$$w_2 = \begin{cases} w_1 - 2, & \text{if } w_1 > 2. \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

- Betingelser som ikke er brugt til at definere variable
- Betingelses specifik oprettelse af invarianter
- Tilføj invarianter til grafen
- Invarianter til summering af overtrædelse betingelser

Endelige graf

x_1



x_2



x_3

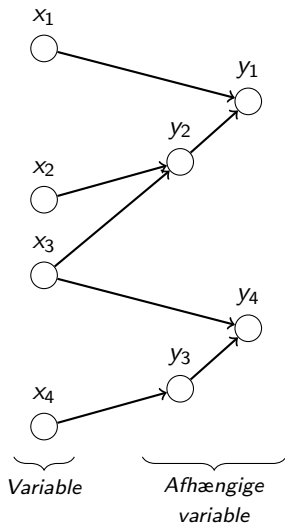


x_4

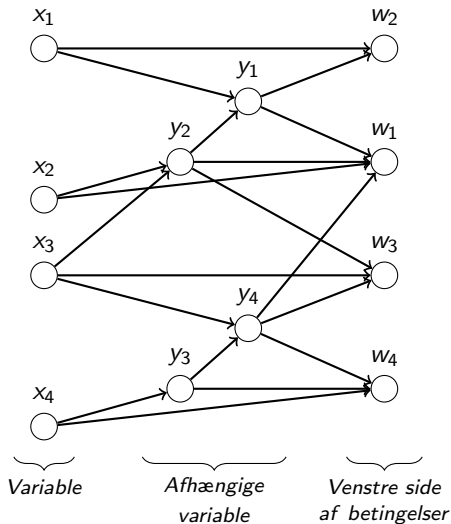



Variable

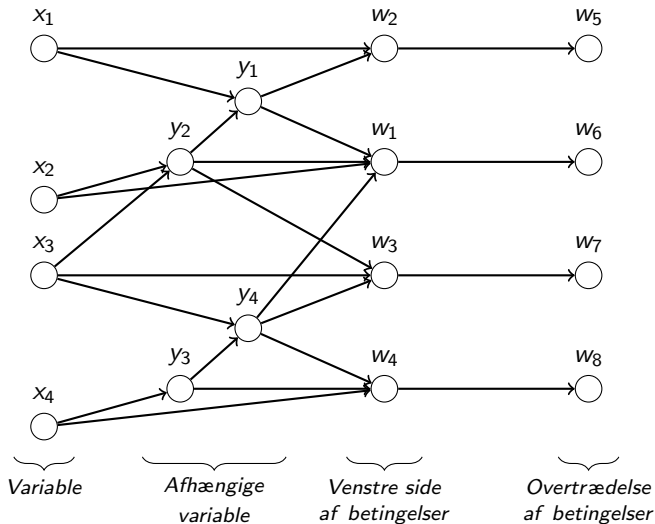
Endelige graf



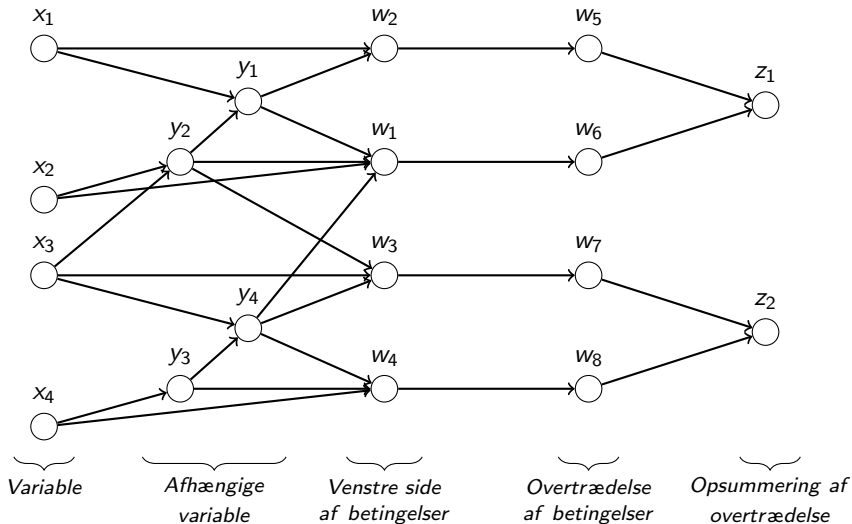
Endelige graf



Endelige graf



Endelige graf



Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres

Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant

Ordning af invarianter

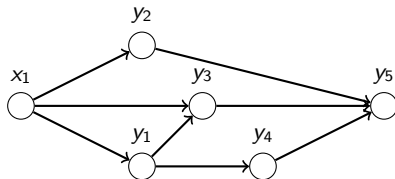
- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen

Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable

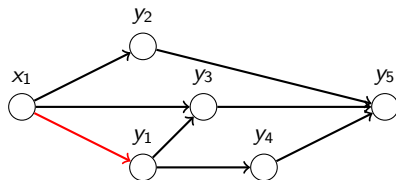
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



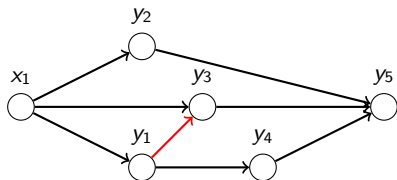
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



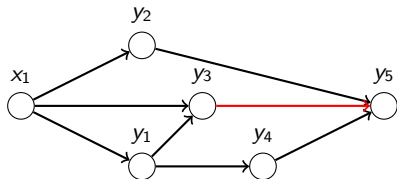
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



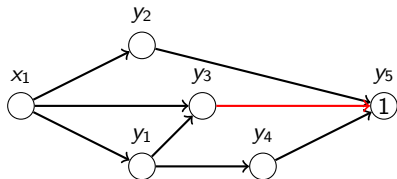
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



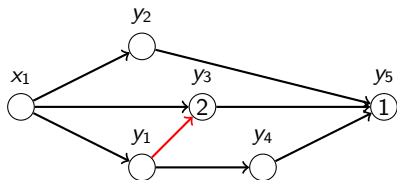
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



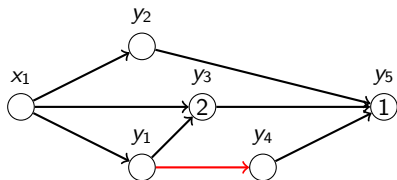
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



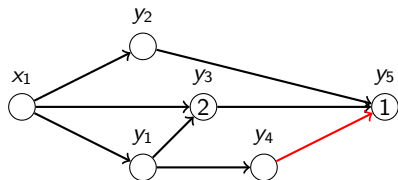
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



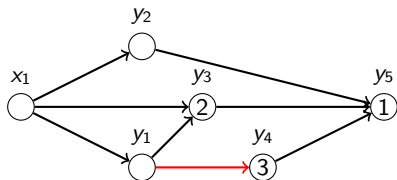
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



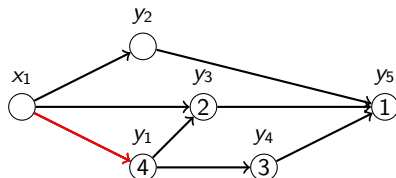
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



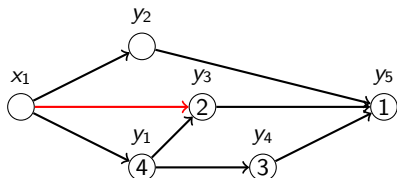
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



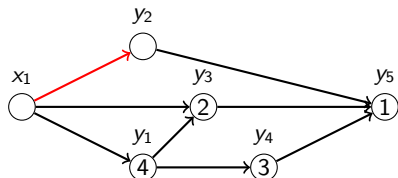
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



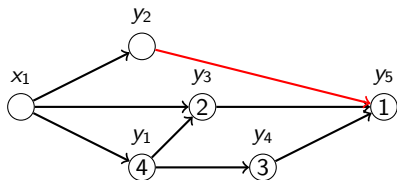
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



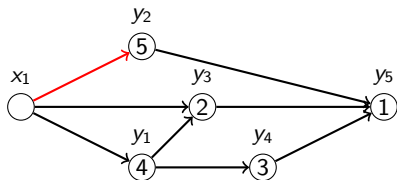
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



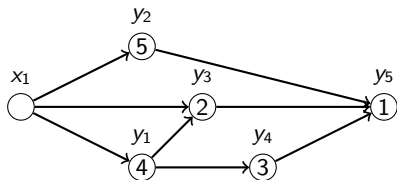
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



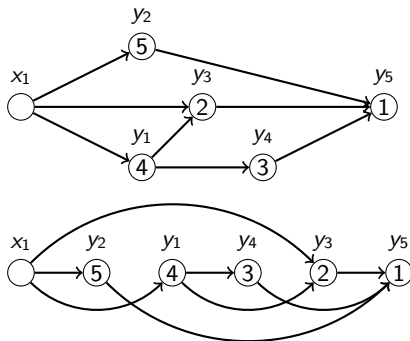
Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



Ordning af invarianter

- Lav ordning af invarianter til når de skal opdateres
- Forhindre flere opdateringer af samme invariant
- Ordningen kan laves med dybde først søgning i grafen
- Opret en liste for hver uafhængig variable



Basis for algoritmerne

Fra universitet til stadion



- Find den optimale løsning:
Kan være alt fra trivielt til
meget svært

Basis for algoritmerne

Fra universitet til stadion



- Find den optimale løsning:
Kan være alt fra trivielt til meget svært
- First improvement:
Første der forbedre nuværende situation

Basis for algoritmerne

Fra universitet til stadion



- Find den optimale løsning:
Kan være alt fra trivielt til meget svært
- First improvement:
Første der forbedre nuværende situation
- Best improvement:
Bedste forbedring af nuværende situation

Basis for algoritmerne

Fra universitet til stadion



- Find den optimale løsning:
Kan være alt fra trivielt til meget svært
- First improvement:
Første der forbedre nuværende situation
- Best improvement:
Bedste forbedring af nuværende situation
- Random walk:
En række tilfældige valg

Lokalsøgningsalgoritmer

Bruger kun 1-flip
lokalsøgning

Lokalsøgningsalgoritmer

Bruger kun 1-flip
lokalsøgning

Forkortelser:

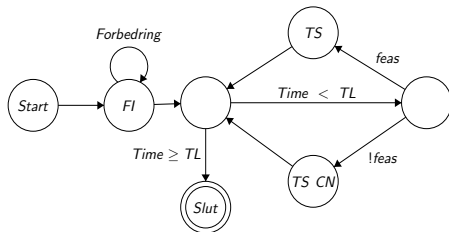
- FI: First improvement
- TS: Tabu search
- CN: Conflict only neighborhood
- TL: Time limit
- RW: Random walk
- MC: Minimum conflict heuristic

Lokalsøgningsalgoritmer

Bruger kun 1-flip
lokalsøgning

Forkortelser:

- FI: First improvement
- TS: Tabu search
- CN: Conflict only neighborhood
- TL: Time limit
- RW: Random walk
- MC: Minimum conflict heuristic

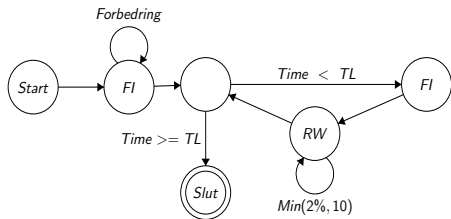
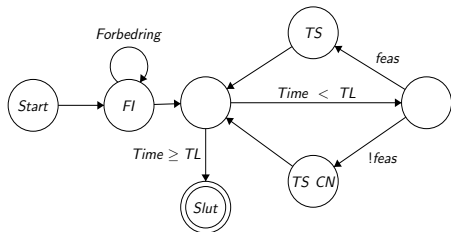


Lokalsøgningsalgoritmer

Bruger kun 1-flip
lokalsøgning

Forkortelser:

- FI: First improvement
- TS: Tabu search
- CN: Conflict only neighborhood
- TL: Time limit
- RW: Random walk
- MC: Minimum conflict heuristic

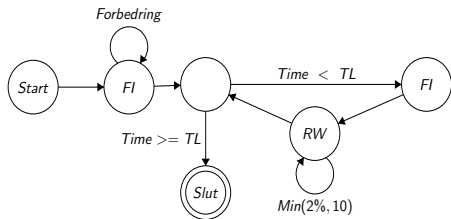
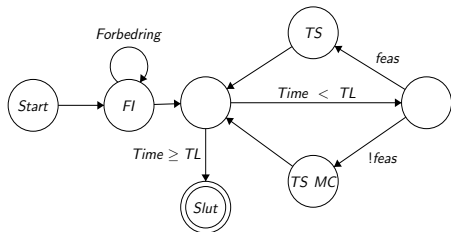


Lokalsøgningsalgoritmer

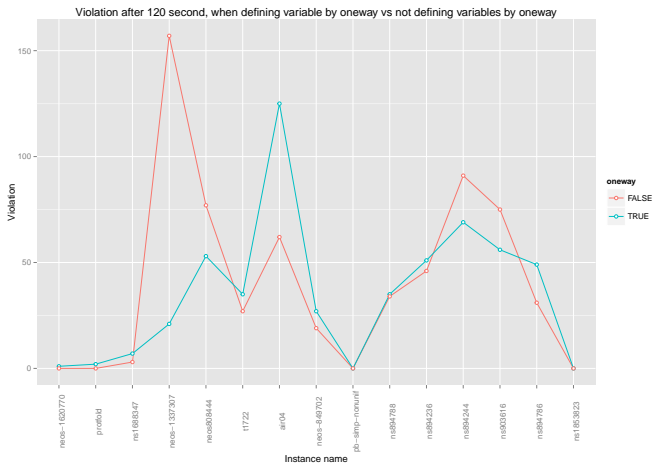
Bruger kun 1-flip
lokalsøgning

Forkortelser:

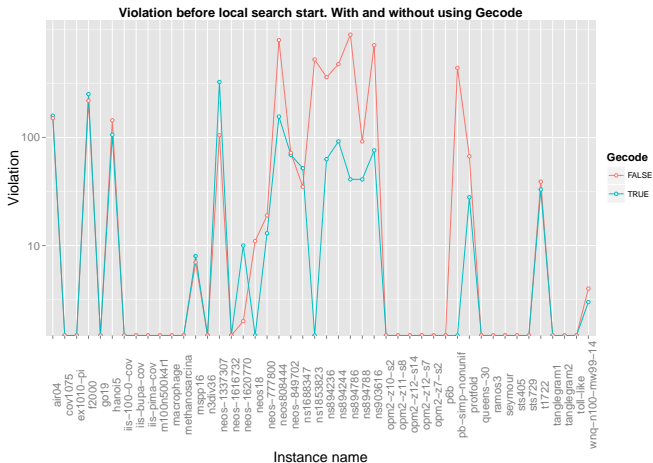
- FI: First improvement
- TS: Tabu search
- CN: Conflict only neighborhood
- TL: Time limit
- RW: Random walk
- MC: Minimum conflict heuristic



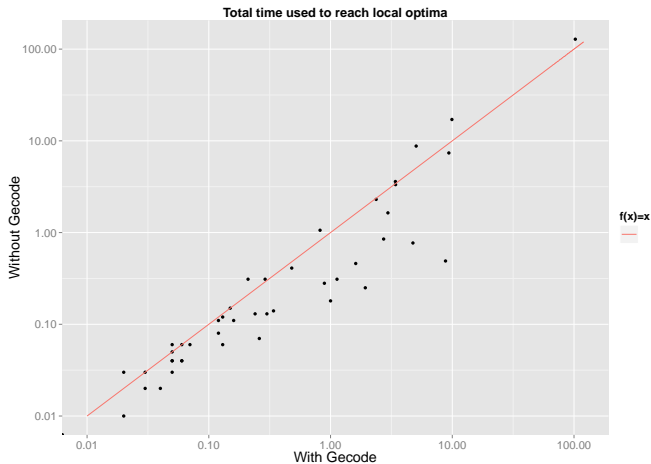
Effekten af envejsbetingelser (oneway constraints)



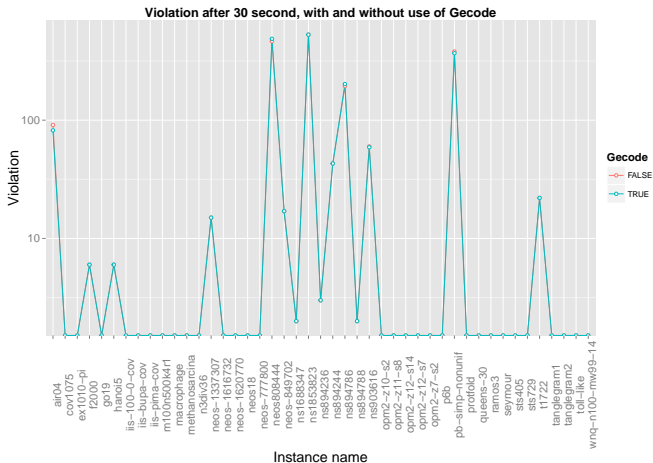
Gecode som konstruksjons heuristik



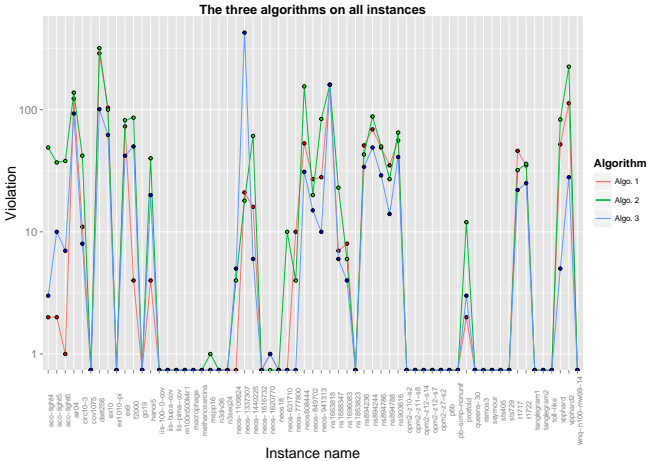
Gecode som konstruktions heuristik



Gecode som konstruktions heuristik

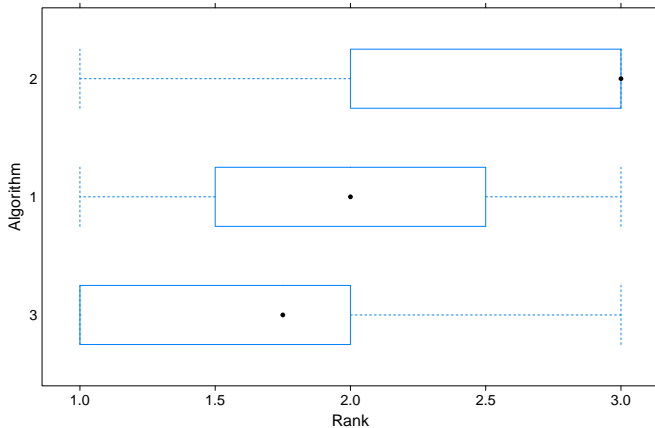


Algoritmerne mod hinanden

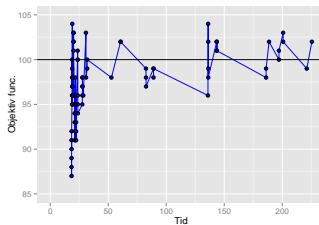
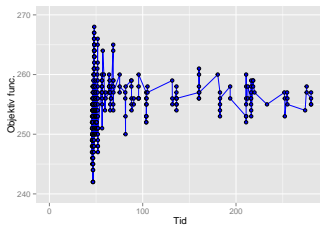
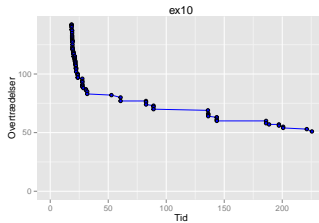
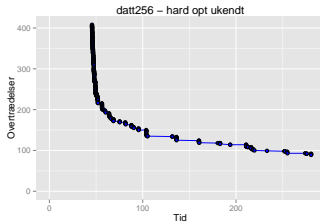


Algoritmerne mod hinanden

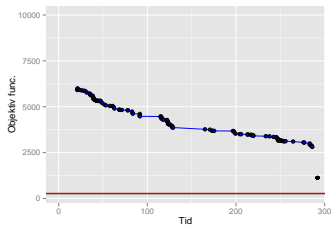
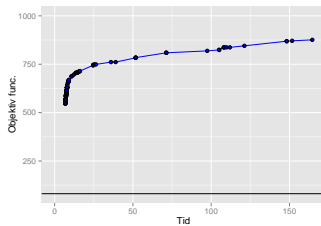
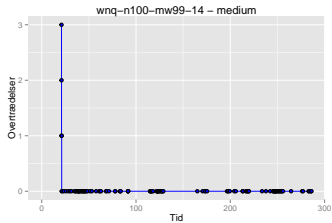
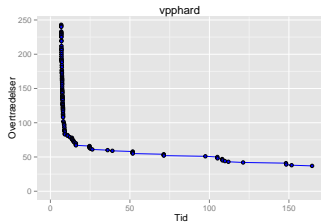
Boxplots over rank



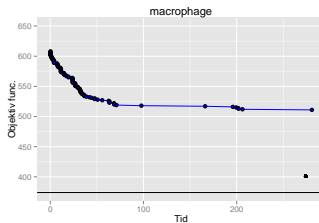
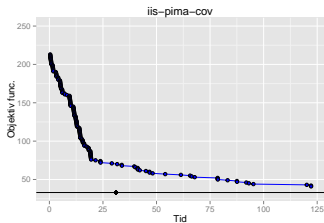
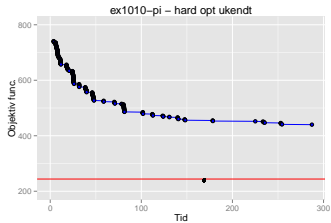
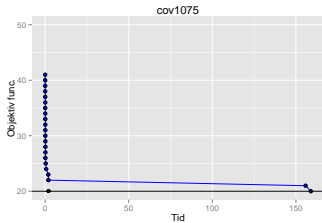
Eksempel



Eksempel



Eksempel - alle gyldige



Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik
hvis Gecode ikke kan bruges

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik
hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som
neighborhood operation

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik
hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som
neighborhood operation
- Implementering af simuleret
udglødning

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik
hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som
neighborhood operation
- Implementering af simuleret
udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for
tabu søgning

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik
hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som
neighborhood operation
- Implementering af simuleret
udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for
tabu søgning
- Undersøg effekt af opdeling af
variable, envejsbetingelser

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som neighborhood operation
- Implementering af simuleret udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for tabu søgning
- Undersøg effekt af opdeling af variable, envejsbetingelser

Udvidelser:

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som neighborhood operation
- Implementering af simuleret udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for tabu søgning
- Undersøg effekt af opdeling af variable, envejsbetingelser

Udvidelser:

- Tillad ikke heltalskoefficienter

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som neighborhood operation
- Implementering af simuleret udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for tabu søgning
- Undersøg effekt af opdeling af variable, envejsbetingelser

Udvidelser:

- Tillad ikke heltalskoefficienter
- Behandling af heltalsvariable

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som neighborhood operation
- Implementering af simuleret udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for tabu søgning
- Undersøg effekt af opdeling af variable, envejsbetingelser

Udvidelser:

- Tillad ikke heltalskoefficienter
- Behandling af heltalsvariable
- Flere typer af betingelser

Forbedringer og udvidelser

Forbedringer:

- En bedre konstruktionsheuristik hvis Gecode ikke kan bruges
- Implementering swap som neighborhood operation
- Implementering af simuleret udglødning
- Test af flere parametre bl.a. for tabu søgning
- Undersøg effekt af opdeling af variable, envejsbetingelser

Udvidelser:

- Tillad ikke heltalskoefficienter
- Behandling af heltalsvariable
- Flere typer af betingelser
- Flere skift mellem CP og LS

Konklusion

- Et CBLS system der danner grundlag for udvidelser

Konklusion

- Et CBLS system der danner grundlag for udvidelser
- Gecode begrænset effekt på Binær programmering

Konklusion

- Et CBLS system der danner grundlag for udvidelser
- Gecode begrænset effekt på Binær programmering
- Alle variable behandlet med samme neighborhood operation, giver ingen effekt af envejsbetingelser

Konklusion

- Et CBLS system der danner grundlag for udvidelser
- Gecode begrænset effekt på Binær programmering
- Alle variable behandlet med samme neighborhood operation, giver ingen effekt af envejsbetingelser
-

Konklusion

- Et CBLS system der danner grundlag for udvidelser
- Gecode begrænset effekt på Binær programmering
- Alle variable behandlet med samme neighborhood operation, giver ingen effekt af envejsbetingelser
-
-