

Answer Set Programming

Włodzimierz Drabent

IPI PAN, seminarium zespołu, styczeń 2021
Wersja 1.0, 28 stycznia 2021

1 / 46

Światowy Dzień Logiki

14 stycznia
Światowy Dzień Logiki / World Logic Day
(UNESCO, International Council for Philosophy and Human Sciences)

Data śmierci Kurta Gödla i urodzin Alfreda Tarskiego

<https://en.unesco.org/commemorations/worldlogicday>
https://en.wikipedia.org/wiki/World_Logic_Day

UNESCO:
The ability to think is one of the most defining features of humankind. ...

Vienna World Logic Day Lecture, Prof. Georg Gottlob
on the future of logic in the world shaped by AI, 2021-01-14 17:00 CET
<https://logicday.vcla.at/vienna-logic-day-lecture/>

2 / 46

Światowy Dzień Logiki

We overlook it at our own peril, as Logic is even more inexorable than taxes and death.

Valeria de Paiva

There's nothing you can do that can't be done
Nothing you can sing that can't be sung
Nothing you can say, but you can learn how to play the game
It's easy
All you need is logic
All you need is logic
All you need is logic, logic
Logic is all you need!

Arnon Avron

Wielu najpotężniejszych czarodziejów nie ma pojęcia o logice.
Dla nich to pułapka bez wyjścia.

Harry Potter, tom 1

3 / 46

Plan

- ▶ Programowanie w logice – wprowadzenie
- ▶ Potrzeba negacji. CWA, NAF
- ▶ Programy z negacją
- ▶ Semantyka modeli stabilnych
 - ▶ ...
 - ▶ metody implementacji
- ▶ Rozszerzenia
- ▶ Uwagi

Tytuł: ASP – brak polskiego terminu(?)

Przepraszam za dwujęzyczność slajdów

4 / 46

Programowanie w logice

inne slajdy

5 / 46

The need for negation (or for non-monotonic reasoning)

No negative consequences of definite clause programs.

Ex.: $\neg salary(a, 99)$ does not follow from program

$$P_s = \{ salary(a, 3000). \quad salary(b, 4000). \quad salary(c, 5000). \}$$

But we (sometimes) would like to derive it.

So we **derive** $\neg A$ from P **when** $P \not\models A$ and A is ground.

This is called **Closed World Assumption** (CWA).


Założenie o zamkniętym świecie

7 / 46

Closed World Assumption (CWA)

Df. (CWA): $P \vdash_{\text{CWA}} \neg A$ when $P \not\models A$ and A is ground.
(derive $\neg A$ from P)

Fact (about definite clause LP)

 Logic programs can compute whatever is computable.
(Any r.e. set of terms can be defined by a definite clause program.)

∴ CWA may be not recursively enumerable (i.e. not computable).
As $\{ A \mid P \models A, A \text{ is ground} \}$ is r.e. but may be not recursive.

6 / 46

8 / 46

Prz.:

P : $high_salary \leftarrow employed, educated.$
 $educated \leftarrow high_salary.$
 $employed \leftarrow motivated.$
 $motivated.$

Zbiór logicznych konsekwencji (bez zmiennych),
czyli najmniejszy (względem \subseteq) model Herbranda programu P

$$\mathbf{M}_P = \{ motivated, employed \}$$

Negation as Finite Failure (NAF, NFF)

What we usually compute in Prolog is **Negation as Finite Failure**:

Df.: $P \vdash_{\text{NAF}} \neg A$ when an SLD-tree for A is failed (better: finitely failed)
 A – atom, i.e. is **finite** and **without answers**
 maybe nonground

The difference CWA – NAF sometimes not understood.

Ex.: $P = \{p \leftarrow p\}$ $P \vdash_{\text{CWA}} \neg p$ $P \not\vdash_{\text{NAF}} \neg p$

NAF compatible with CWA:

If $P \vdash_{\text{NAF}} \neg A$ then $P \vdash_{\text{CWA}} \neg A$
 (If A fails then $P \not\models A$)

NAF can be defined logically, by **program completion**

Roughly: \leftrightarrow instead of \leftarrow

9 / 46

Wnioskowanie niemonotoniczne

(*nonmonotonic reasoning*)

Wnioskowanie **monotoniczne**

$$P \vdash F \Rightarrow P \cup P' \vdash F$$

Np. standardowa logika 1. rzędu.

NAF, CWA – wnioskowanie niemonotoniczne

10 / 46

Programy z negacją

Oczywiście chcielibyśmy użyć negacji **w programach**.

Prz.: $\% \text{listd}(X)$ – X jest listą parami różnych elementów

$\text{listd}([])$.

$\text{listd}([H|T]) \leftarrow \text{listd}(T), \neg \text{member}(H, T)$.

$\text{member}(X, [X|L])$.

$\text{member}(X, [Y|L]) \leftarrow \text{member}(X, L)$.

Prz.: $\% \text{subset}([x_1, \dots, x_n], [y_1, \dots, y_m])$ – $\{x_1, \dots, x_n\} \subseteq \{y_1, \dots, y_m\}$

$P: \text{subset}(L, M) \leftarrow \neg \text{notsubset}(L, M)$.

$\text{notsubset}(L, M) \leftarrow \text{member}(X, L), \neg \text{member}(X, M)$.

11 / 46

Programy z negacją – składnia

Df.:

Literal – an atom (**positive** literal) or a negated atom (**negative** literal).

Clause (general clause)

$$H \leftarrow L_1, \dots, L_n$$

where $n \geq 0$, H – atom, L_1, \dots, L_n – literals,

(comma stands for \wedge).

Program (general program, normal program) – a set of clauses.

Query (general query) – L_1, \dots, L_n .

Note: No negative literal is a logical consequence of a general program.

12 / 46

Programy z negacją – kłopoty z semantyką

Ale jakie ma być właściwie znaczenie takich programów ?
 Prolog dostarcza naiwnej implementacji rozszerzenia NAF,
 która jest często bezsensowna.
 Sprawy nieoczywiste i trudne.
 Np. błędna główna definicja w 1. wyd. głównego podręcznika 1987 r.
 Temat intensywnych badań, głównie przetom lat '80 i '90.
 Dopracowano się “właściwych” rozszerzeń CWA i NAF.

13 / 46

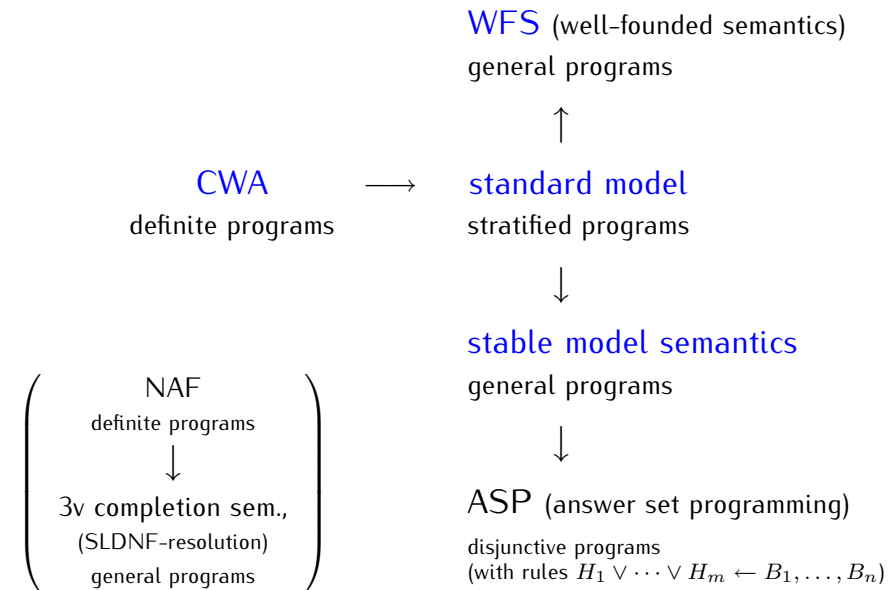
Uogólnienie CWA na programy warstwowe

oczywiste, dość łatwe

Trudności, gdy mamy “rekursję przez negację”

14 / 46

Semantyka programów z negacją



15 / 46

Sprawy techniczne

Wyrażenia (termy, formuły) bez zmiennych – *ground*, *ustalone* (?)

ground(P) – zbiór ustalonych instancji klauzul z programu *P*

Interpretacje Herbranda

Dziedzina – zbiór termów ustalonych

Termy ustalone interpretowane jako one same

Baza Herbranda \mathcal{HB} – zbiór atomów ustalonych

Interpretacja \equiv podzbiór bazy Herbranda

Najmniejszy model Herbranda dla programu *P* **bez negacji**

$$\mathbf{M}_P = \{ A \in \mathcal{HB} \mid P \models A \}$$

16 / 46

Stable Model Semantics (s.m.s.)

S.m.s. given by 2-valued **stable** Herbrand **models**.

Also called **answer sets**

A program may have 0, 1, or more stable models.

Pragmatics: Problem solutions = stable models.

Other branches of LP – problems solutions = program answers

17 / 46

Stable Model Semantics (s.m.s.)

Main idea:

Guess a (2-valued, Herbrand) interpretation M .

Use M to evaluate **negative** literals of $P \rightsquigarrow P^M$ (**reduct**).

P^M – positive program.

(the least Herbrand model of P^M)

If the ground atomic consequences of P^M are M

$$\underbrace{\{A \in \mathcal{HB} \mid P^M \models A\}}_{\mathbf{M}_{P^M}} = M$$

then M is a **stable model** of P .

Details: P^M is $\text{ground}(P)$ without

- ▶ each rule with some $\neg A$, s.t. $M \models A$
- ▶ each $\neg A$, s.t. $M \models \neg A$

18 / 46

Stable Model Semantics

Ex.: $P_1 = \{p \leftarrow \neg q\}$ – one stable model $\{p\}$

$$P_1^{\{p\}} = \{p \leftarrow\} \quad \{A \in \mathbf{B}_A \mid P_1^{\{p\}} \models A\} = \{p\}$$

$P_2 = \{p \leftarrow \neg p\}$ – no stable models

$P_3 = \{p \leftarrow \neg q; q \leftarrow \neg p\}$ – two stable models $\{p\}$ and $\{q\}$

$$P_3^{\{p\}} = \{p \leftarrow\} \quad P_3^{\{q\}} = \{q \leftarrow\}$$

$P_4 = \{p \leftarrow q; q \leftarrow \neg p\}$ – no stable models

In s.m.s. we are usually not interested in answers/consequences, but in whole stable models.

19 / 46

Example, s.m.s., subsets

Notation: p^M – predicate p in interpretation M

A program fragment defining p^M to be a subset of q^M
(and np^M to be $q^M \setminus p^M$):

$$p(X) \leftarrow q(X), \neg np(X). \quad np(X) \leftarrow q(X), \neg p(X).$$

q^M defined by the rest of the program, e.g. by facts $q(c_1), \dots, q(c_n)$.

A stable model for each subset of q^M . 2^n stable models.

Note: Without the clause for np we get $p^M = q^M$.

20 / 46

Example, s.m.s., subsets (2)

Notes:

The same task in “standard” logic programming:
most likely by defining a predicate *subs*(*Subset*, *Set*),
with a suitable representation of sets (e.g. by lists).

FOL (first order logic) description of $p^M \subseteq q^M$ is $q(X) \leftarrow p(X)$.
Does not work as a logic program.

21 / 46

Ograniczenia pragmatyczne

1. Wymaganie – wykluczamy z języka symbole funkcyjne
(bo potrzebujemy skończonego zbioru obiektów)

Dopuszczalne **tylko state**. 

Nie tylko definicje, ale i implementacje operują na
instancjach bez zmiennych klauzul programu itp.

Grounding

$$P \rightsquigarrow \text{ground}(P)$$

2. Reguły winne być “safe” – każda zmienna występuje w
niezanegowanym literale po prawej stronie.

22 / 46

Example, s.m.s., expressing integrity constraints

To state that some of L_1, \dots, L_n must be false,
take a new symbol f , use rule:

$$f \leftarrow \neg f, L_1, \dots, L_n$$

f false in each stable model (as f true \rightsquigarrow contradiction)

so in each stable model some L_i must be false.

Abbreviated as

$$\leftarrow L_1, \dots, L_n \quad (\text{or } :- L_1, \dots, L_n)$$

23 / 46

Example, s.m.s., integrity constraints

3-colouring of a graph, described by predicates *node*/1, *edge*/2.
(From Eiter *et al.* “ASP: A primer”)

% $b(X)$ – node X coloured blue, $r(X)$ – ... red, $g(X)$ – ... green.

$$\begin{aligned} b(X) &\leftarrow \text{node}(X), \neg r(X), \neg g(X). \\ r(X) &\leftarrow \text{node}(X), \neg b(X), \neg g(X). \\ g(X) &\leftarrow \text{node}(X), \neg r(X), \neg b(X). \end{aligned}$$

Each node gets
exactly one colour

$$\begin{aligned} f &\leftarrow \neg f, b(X), b(Y), \text{edge}(X, Y). \\ f &\leftarrow \neg f, r(X), r(Y), \text{edge}(X, Y). \\ f &\leftarrow \neg f, g(X), g(Y), \text{edge}(X, Y). \end{aligned}$$

No neighbours are blue
... red
... green

24 / 46

Przykład

Cykle Hamiltona

hamilton.dlv

Dane (instancja problemu) i logika (opis rozwiązania)
– oddzielne części programu

25 / 46

Krótko o implementacji

1. Przekształcenie do programu bez zmiennych (*grounding*)

$$P \rightsquigarrow \text{grnd}P$$

2. Znajdowanie modelu dla programów j.w. Dwa podejścia

2a. Bezpośrednio. Podobnie jak DPLL lub CDCL dla SAT.

2b. Tłumaczenie do SAT

$$\text{grnd}P \rightsquigarrow \text{comp}(\text{grnd}P) \cup \text{loop_formulas}(\text{grnd}P)$$

$\text{comp}(P)$ – dopełnienie (*completion*) programu

26 / 46

Dopełnienie programu

Idea: zamienić \leftarrow na \leftrightarrow

Np.

P	$\text{comp}(P)$
$p \leftarrow q$	$p \leftrightarrow q \vee (r \wedge s)$
$p \leftarrow r, s$	$\neg s$ jeśli w P nie ma reguły $s \leftarrow \dots$
$r \leftarrow \dots$	$r \leftrightarrow \dots$

Loop formulas

by wykluczyć modele, które nie są stabilne

Np. $p \leftarrow p$ $p \leftrightarrow p$ loop formulas: $\neg p$

$p \leftarrow \neg q$ $p \leftrightarrow \neg q$ loop formulas: \emptyset
 $q \leftarrow \neg p$ $q \leftrightarrow \neg p$

27 / 46

Mocna negacja

Rozważana negacja \neg (w programach *not*) zw. z CWA
(domyślna negacja, *default negation*)

$\dots \vdash \neg p$ tylko wtedy gdy $\dots \not\models p$.

Czasami potrzebujemy określić jawnie,

kiedy *nie* p ma zachodzić

Np. predykaty p i np w przykładzie z podzbiarami

28 / 46

Uogólnienia – mocna negacja

Aby uniknąć "ręcznego" tworzenia nowych symboli
specjalna konstrukcja wbudowana w jęz. programowania:
dla każdego predykatu p nowy symbol $\neg p$

i reguła $\leftarrow \neg p(\vec{X}), p(\vec{X})$

Można powiedzieć, że (z punktu widzenia silnej negacji \neg)
mamy **logikę 3-wartościową**

$$\left. \begin{array}{ll} A \text{ prawdziwe w } I & A \in I \\ A \text{ fałszywe w } I & \neg A \in I \\ A \text{ u w } I & A \notin I, \neg A \notin I \end{array} \right\} \neg A \text{ prawdziwe w } I$$

(Pewnie lepiej stosować *not* zamiast \neg , ale...)

29 / 46

Mocna negacja, przykłady

Porównajmy

$$\begin{array}{l} walk \leftarrow at(A, L), crossing(L), \neg train_approaches(L). \\ \text{i} \\ walk \leftarrow at(A, L), crossing(L), \neg train_approaches(L). \end{array}$$

Największy wspólny dzielnik

gcd.dlv

Użycie podwójnej negacji $\neg \neg$

30 / 46

Reguły dysjunktywne

$$a_1 \vee \dots \vee a_k \leftarrow b_1, \dots, b_m, \neg c_1, \dots, \neg c_n, \quad (1)$$

Reguła (1) bez zmiennych jest **spełniona** w modelu Herbranda I , gdy

$$\{b_1, \dots, b_m\} \subseteq I \text{ i } I \cap \{c_1, \dots, c_n\} = \emptyset \\ \text{implikuje } I \cap \{a_1, \dots, a_k\} \neq \emptyset$$

Redukt P^I zdefiniowany jak poprzednio

Uogólnienie modelu stabilnego – **answer set**

Df.: M jest **zbiorem odpowiedzi** (AS, modelem stabilnym?) dla P ,
gdy M jest \subseteq -minimalnym modelem P^M

ASP (Answer Set Programming) – programy
z reg. dysjunktywnymi, mocną negacją i modelami j.w.

31 / 46

Reguły dysjunktywne, przykłady, programy bez negacji

$$broken(left_hand, tom) \vee broken(right_hand, tom) \leftarrow$$

Dwa modele minimalne (=stabilne)

$$\begin{array}{l} a \vee b \leftarrow \\ a \vee c \leftarrow \end{array} \quad \text{Modele minimalne } \{a\} \text{ i } \{b, c\}$$

$$\begin{array}{l} a \vee b \leftarrow \\ a \leftarrow b \end{array} \quad \text{Jeden model minimalny } \{a\}$$

$$\begin{array}{l} a \vee b \leftarrow \\ b \vee c \leftarrow \\ a \vee c \leftarrow \end{array} \quad \text{Trzy modele minimalne } \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}$$

32 / 46

Reguły dysjunktywne, przykłady, programy bez negacji 2

$$male(X) \vee female(X) \leftarrow person(X)$$

Podzbiór zbioru q $p(X) \vee \neg p(X) \leftarrow q(X)$.
zamiast

$$p(X) \leftarrow q(X), \neg \neg p(X). \quad \neg p(X) \leftarrow q(X), \neg p(X).$$

zamiast

$$b(X) \vee r(X) \vee g(X) \leftarrow node(X).$$

$$\begin{aligned} b(X) &\leftarrow node(X), \neg r(X), \neg g(X). \\ r(X) &\leftarrow node(X), \neg b(X), \neg g(X). \\ g(X) &\leftarrow node(X), \neg r(X), \neg b(X). \end{aligned}$$

33 / 46

ASP Przykład

$$\begin{aligned} male(X) \vee female(X) &\leftarrow person(X). \\ bachelor(X) &\leftarrow male(X), \neg married(X). \\ person(joe) &. \end{aligned}$$

Modele stabilne:

$$M_1 = \{person(joe), female(joe)\}$$

$$M_2 = \{person(joe), male(joe), bachelor(joe)\}$$

$$M_3 = \{person(joe), male(joe), married(joe)\} \text{ nie jest m. stabilnym}$$

34 / 46

ASP Przykłady

$$\begin{aligned} a \vee b &\leftarrow \\ a &\leftarrow b \end{aligned}$$

Jeden model minimalny $\{a\}$

$$\begin{aligned} a \vee b &\leftarrow \\ a &\leftarrow b \\ b &\leftarrow a \end{aligned}$$

Jeden model minimalny $\{a, b\}$

$$\begin{aligned} a \vee b &\leftarrow \\ \leftarrow b, \neg a \end{aligned}$$

Jeden model stabilny $\{a\}$

$$\begin{aligned} a \vee b &\leftarrow \\ \leftarrow a, \neg b \\ \leftarrow b, \neg a \end{aligned}$$

Nie ma modeli stabilnych

35 / 46

Łamigłówka programistyczna

Nieistnienie rozwiązania problemu – brak modelu stabilnego.

Ale jak

przekazać informację o nieistnieniu rozwiązania pod-problemu do innej części programu?

Przykład 3color+.d1v

36 / 46

Inne rozszerzenia, m.in.

Słabe więzy (weak constraints)

$: \sim \text{Conjunction}$ [Weight:Level]

Minimalizacja sumy wag niespełnionych więzów

Przykład min_sp_tree.dlv

Aggregates

Cardinality atom

$l\{a_1, \dots, a_n\}k$

pośród $\{a_1, \dots, a_n\}$ atomów prawdziwych jest $\geq l, \leq k$

37 / 46

Uwagi

Dwa paradygmaty

1. W programowaniu w logice (z wyjątkiem ASP)
rozwiązaniem problemu są **odpowiedzi** programu
2. W ASP, SAT
rozwiązaniem problemu są **modele** programu

38 / 46

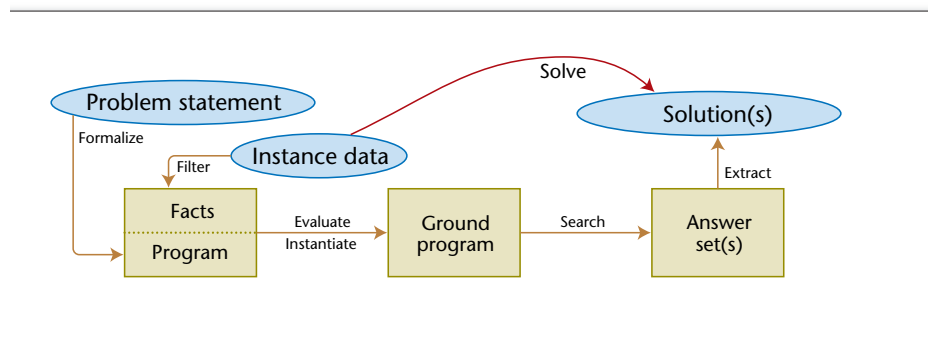


Figure 1. Conceptual Model of the ASP Paradigm.

Program –

definicja kandydatów na rozwiązania
warunki

“The Answer Set Programming Paradigm” T. Janhunen, I. Niemelä, AI Magazine fall 2016

39 / 46

Uwagi

Porównania z SAT

ASP – wnioskowanie niemonotoniczne, CWA, zamknięty świat
SAT – monotoniczne, otwarty świat

“the unavailability of modeling languages forces users of SAT-based technology to embed their problem encodings in compilers”

“many concepts frequently encountered in KRR problems [can be modelled in ASP] in a fairly easy way. This includes (un)reachability (and transitive closures), inertia (for solving frame problems), defaults, etc.”

40 / 46

N.p. (z Theory and Practice of Logic Programming)

TLP 3 (4&5): 519–550, 2003. DOI: 10.1017/S1471068403001790

Bounded LTL model checking with stable models

Keijo Heljanko, Ilkka Niemelä

Wg streszczenia:

1-safe Petri net + requirement on its behaviour \rightsquigarrow logic program
 bounded model checking = computing stable models
 compact encodings of bounded reachability, deadlock detection, and...

41 / 46

N.p. (z Theory and Practice of Logic Programming)

TPLP 20 (6): 926–941, 2020. doi:10.1017/S1471068420000241

An Application of ASP in Nuclear Engineering: Explaining the Three Mile Island Nuclear Accident Scenario

Ze streszczenia:

declarative system for supporting operators in the Nuclear Power Plant (NPP) control room.
 diagnosis and explanation of events [...] in NPPs
 the ASP program can be used to explain the series of events [...] in the Three Mile Island [...] accident
 answers to questions such as “why an event occurs?” or “what should be done?” given the collected data.

42 / 46

N.p. (z Theory and Practice of Logic Programming)

TPLP 21 (1): 80–124, 2021. doi:10.1017/S1471068419000449

A Logic-Based Framework Leveraging Neural Networks for Studying the Evolution of Neurological Disorders

F. Calimeri *et al.*

Ze streszczenia:

ML approaches [...] for classification tasks; [...] ASP can play a relevant role in the brain evolution simulation task.
 [...] framework to support physicians [...] at understanding the complex mechanisms underlying neurological disorders.
 The framework relies on a combined use of ML and ASP, and is general enough to be applied in several other application scenarios.

43 / 46

Podsumowanie

44 / 46

Dziękuję !

45 / 46

Złożoność

Każdą relację rekurencyjnie przeliczalną można zdefiniować za pom. programu (bez negacji).

Dla programów bez zmiennych

Istnienie modelu stabilnego NP-zupełne

Z regułami dysjunktywnymi NP^{NP} -zupełne

Programy pierwszego rzędu (skończony zbiór termów “ustalonych”)
– eksponencjalny wzrost (NEXP-zupełne)

46 / 46