

Weryfikacja wspomagana komputerowo

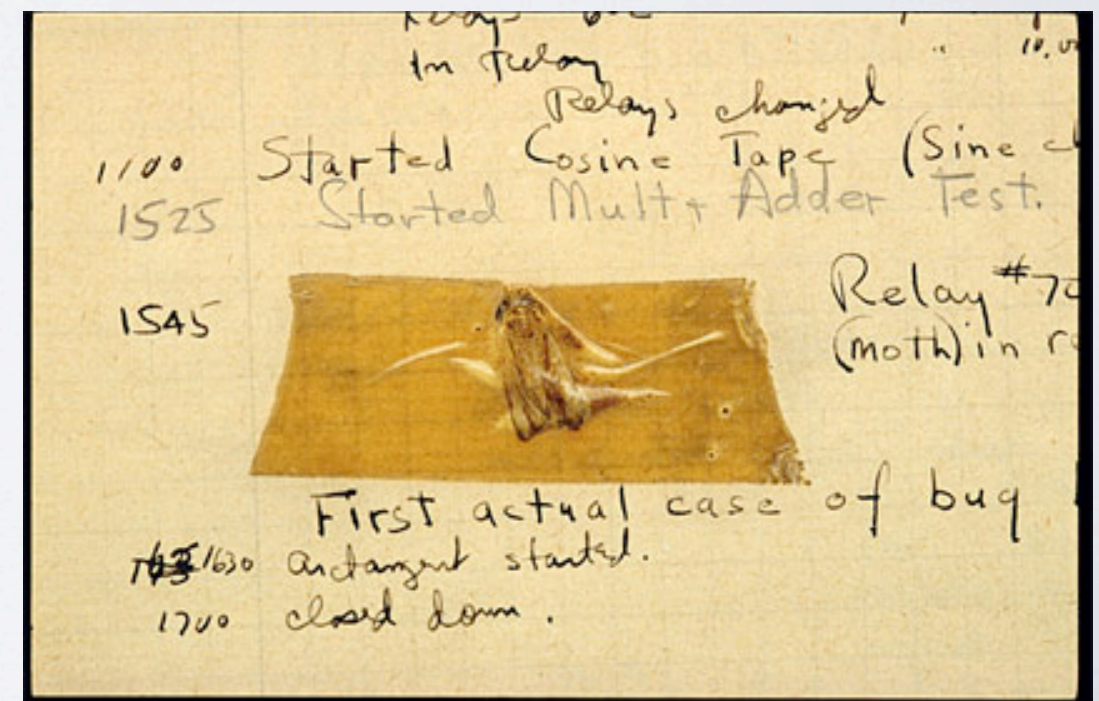
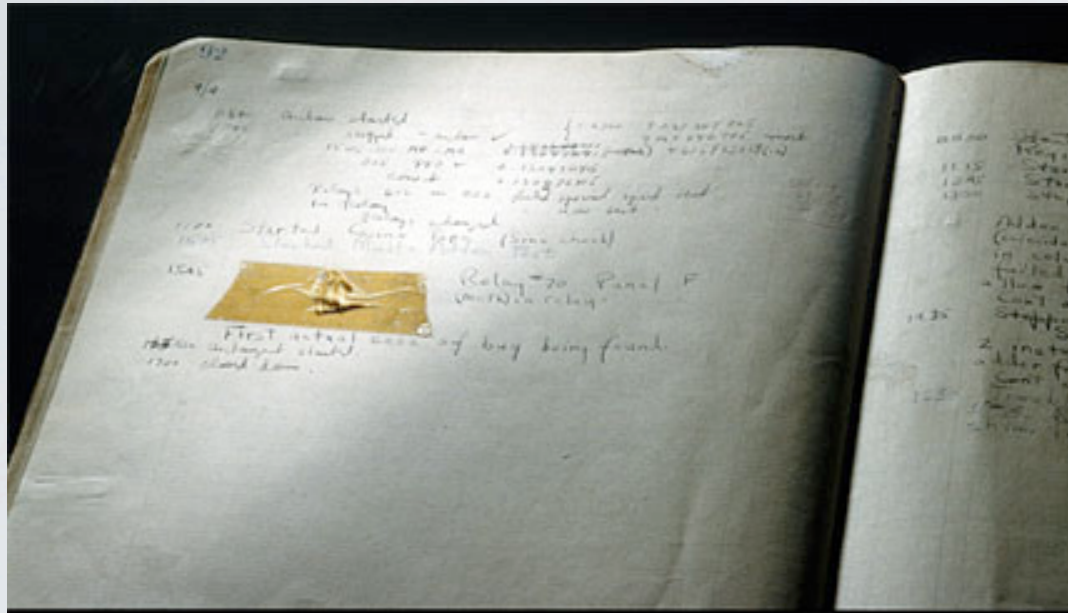
Daria Walukiewicz-Chrząszcz
Uniwersytet Warszawski
2012/2013

Teoria i praktyka wspomaganych komputerowo metod analizy formalnej oprogramowania i układów sprzętowych.

I. Motywacja

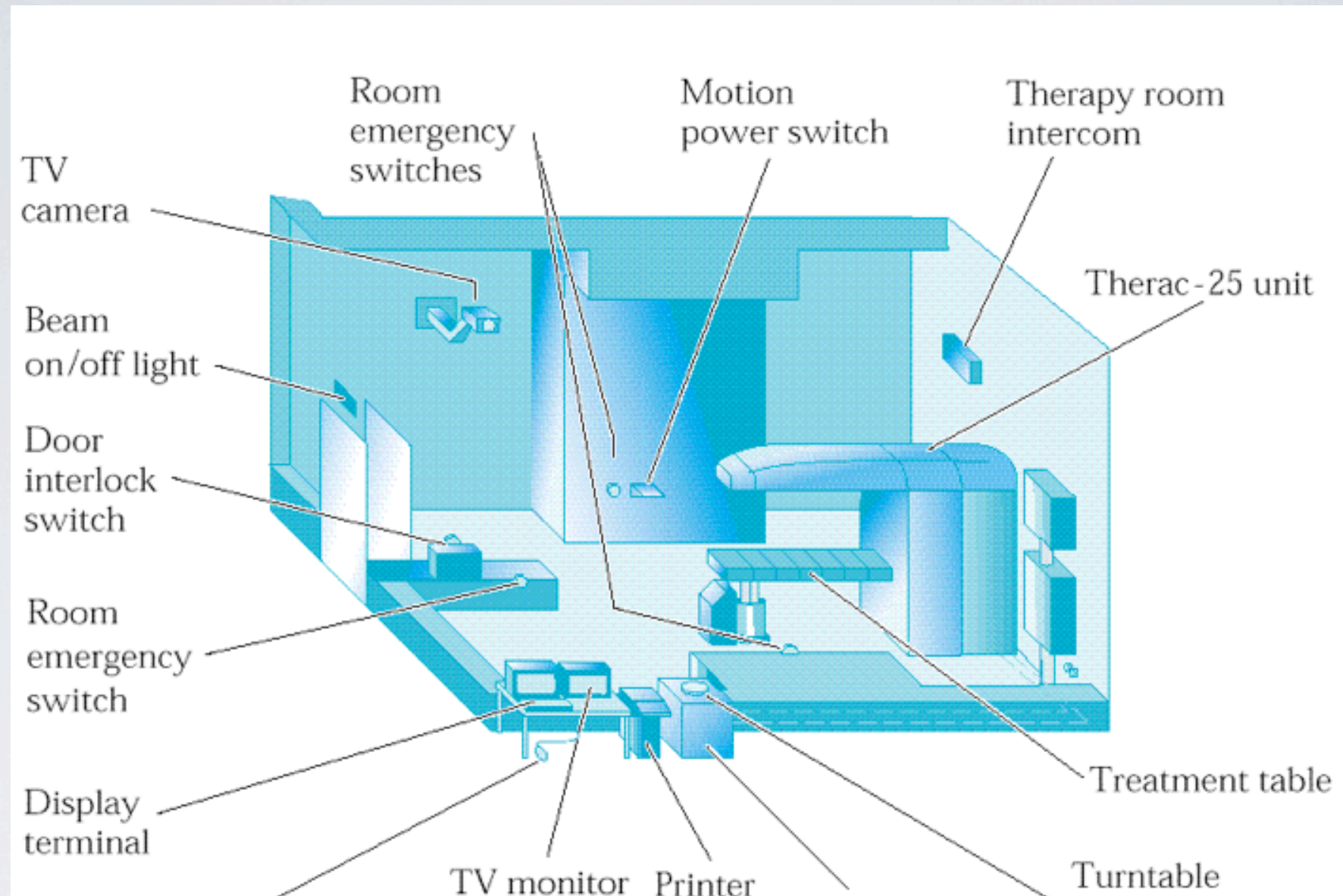
PLUSKWY :)

dokumentacja pracy nad komputerem Mark II



1947 Harvard

THERAC-25



1985-87

- „wyścig”
- przynajmniej 6 ofiar

PENTIUM

- rzadki błąd w operacji dzielenia zmiennopozycyjnego
- Intel wymienił wszystkie wadliwe procesory

październik 1994



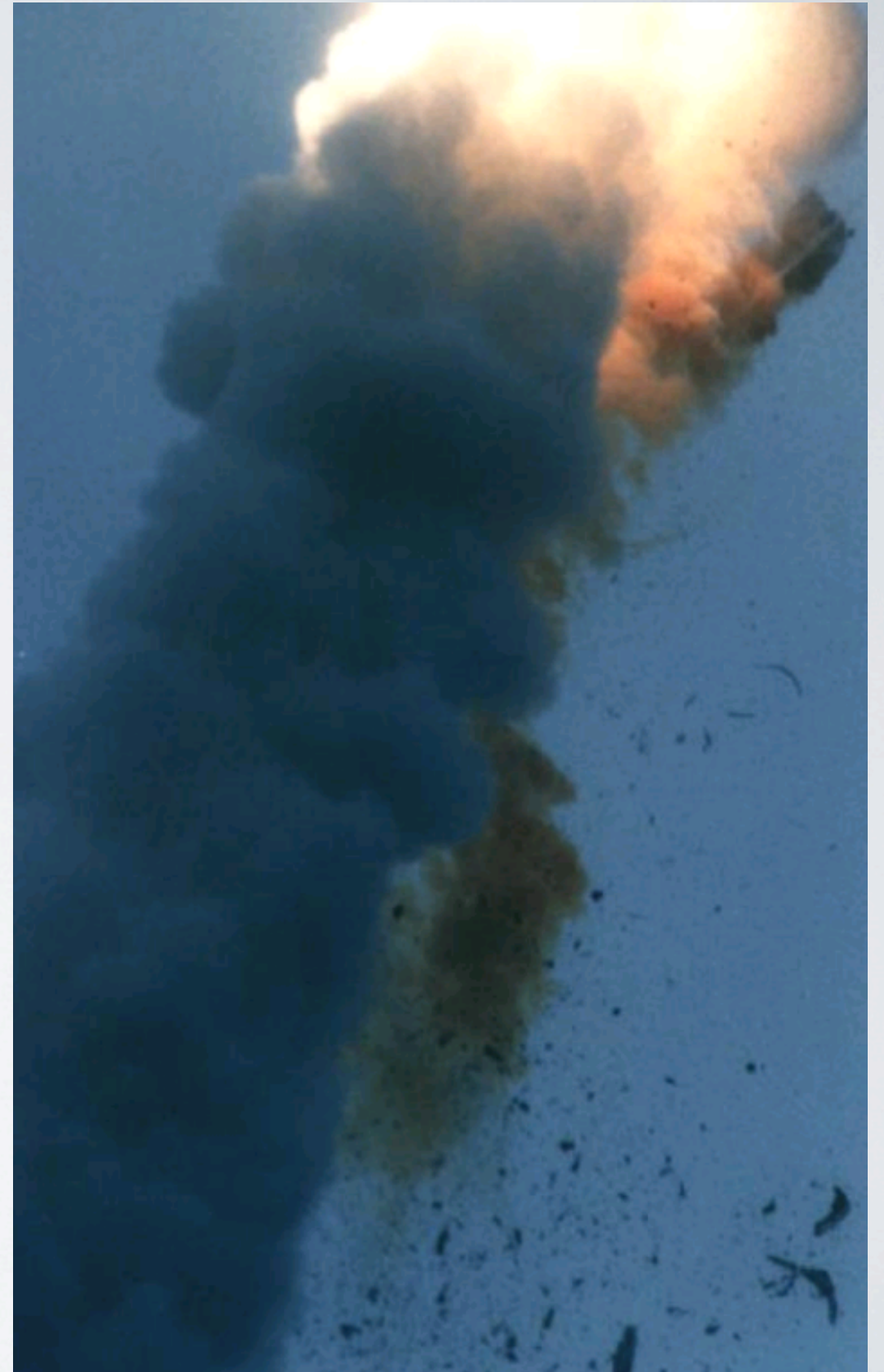
ARIANNE 5

czerwiec 1996

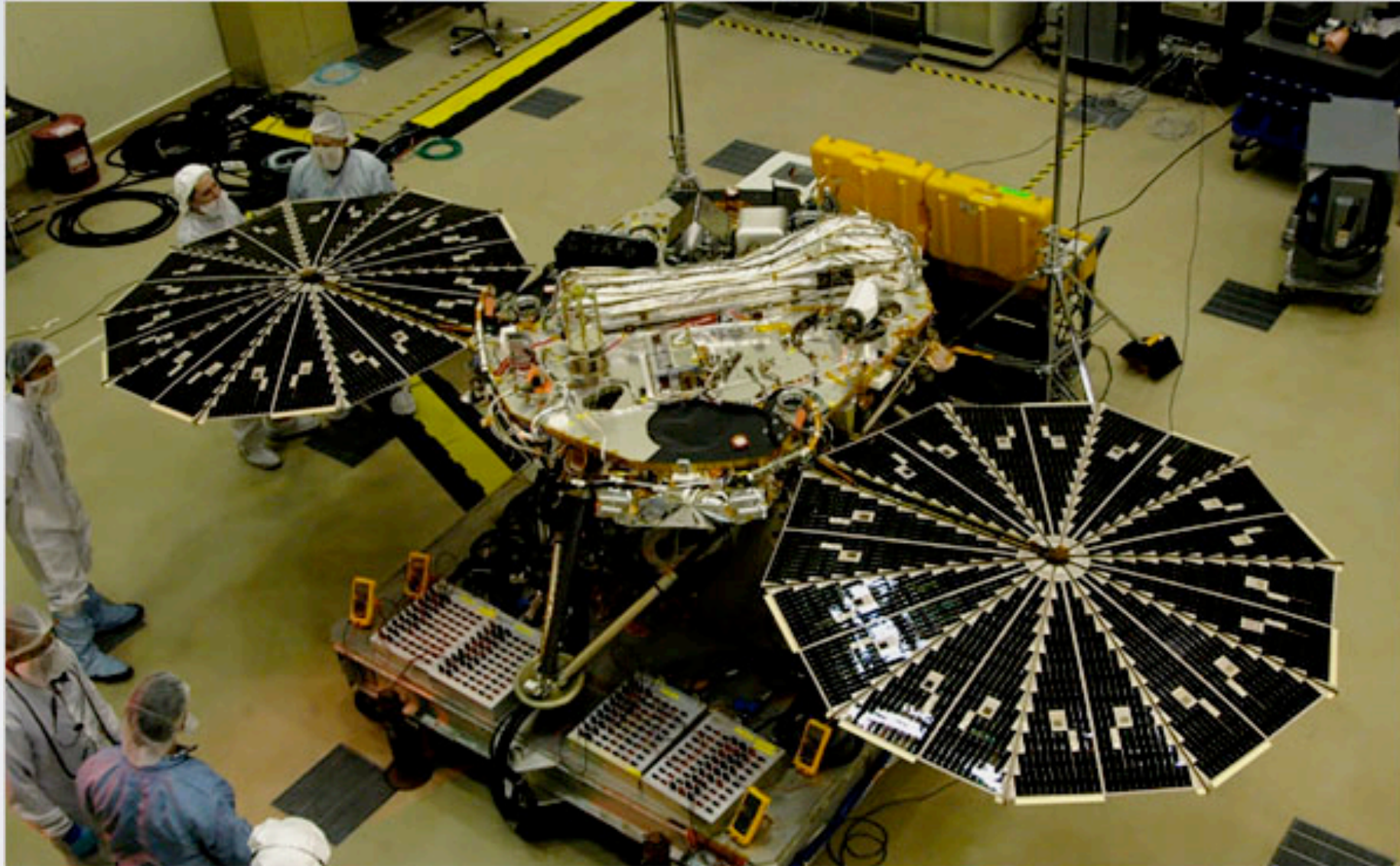


ARIANNE 5

- nieobsłużony wyjątek
- szacunkowy koszt: 600 mln euro

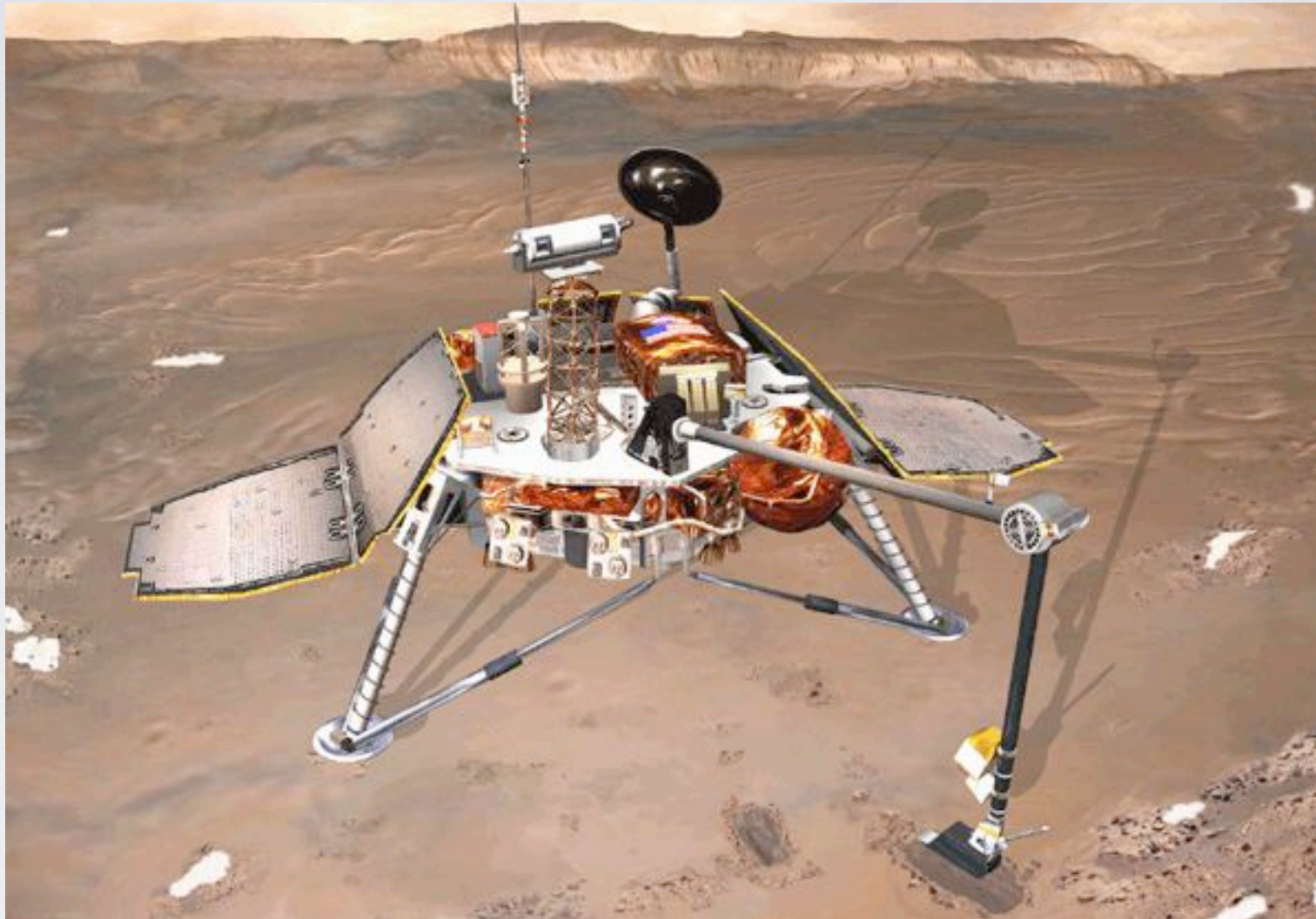


MARS POLAR LANDER



styczeń 1999

MARS POLAR LANDER



grudzień 1999

awaria z powodu
niezainicjowanej zmiennej

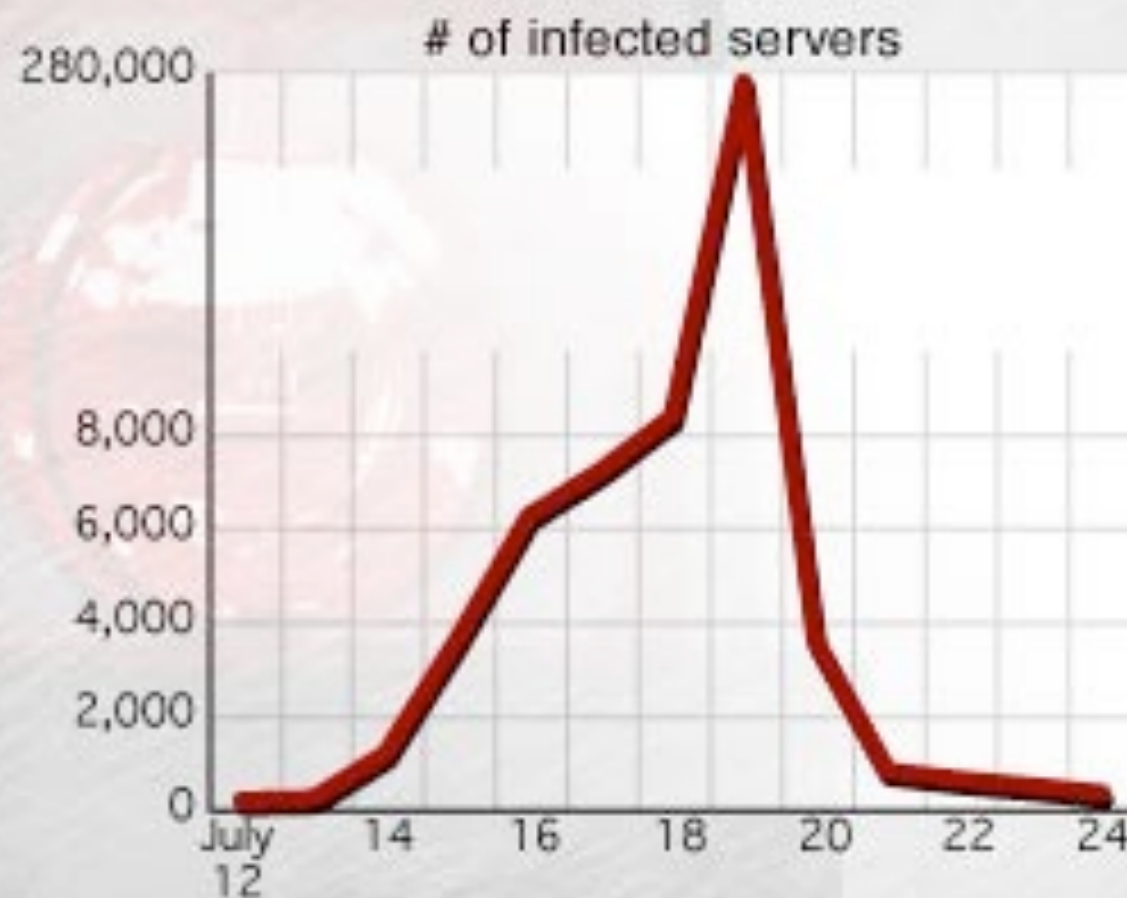
CODE RED

- usterka w Internet Information Server Microsoft'u (przepełnienie bufora)
- szacunkowy koszt: 2.5 miliarda dolarów

lipiec 2001

Spreading fast

The worm slowly spread until July 19, when the number of computers attacking networks skyrocketed. Now, the worm is hibernating, ready to re-infect Aug. 1.



Source: Chemical Abstracts Service

OSTATNIO

- ...
- styczeń 2010: niemieckie karty płatnicze
- październik 2009: utrata danych z telefonów T-Mobile
- grudzień 2008: awaria odtwarzacza Zune (31 grudnia roku przestępnego)
- październik 2008: awaria samolotu Airbus A330-303, 12 poważnie rannych
- 2007, Excel 2007: $77.1 * 850 = 100.000$
- wrzesień 2006: przegrzewające się baterie Sony

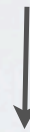
PODSUMOWANIE

- błędy są kosztowne
- ... i często nieakceptowalne (ang. safety critical)
- w zmniejszeniu ich liczby może pomóc [weryfikacja formalna](#)
- testowanie wykazuje obecność błędów, a nie ich brak -
weryfikacja formalna pozwala wykazać brak błędów

II. Weryfikacja formalna

WERYFIKACJA A POSTERIORI

co odpowiada błąd z ustawionym a
Grouilo to całkowitym zalewaniem to
things to było w odległym domu.
w wielkiej pranie zaczęły się na
zabójcą w pięknym sposobie na g
rozperne nakrycie. W tej sytuacji z
ci mozy wyznaczył się Franciszki
nowarce z pomocą.



```
End  
Private Sub tbtou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
brwWebBrows  
Case "Home"  
uWebBro
```



WERYFIKACJA A POSTERIORI

co odpowiada błąd z ustawionym a
Grouilo to całkowitym zalewaniem to
things to było w odległym domu.
w wielkiej pranie zaczęły się na
zabójcą w pięknym sposobie na g
rozperne nakrycie. W tej sytuacji z
ci mozy wyznaczył się Franciszki
nowarce z pomocą.



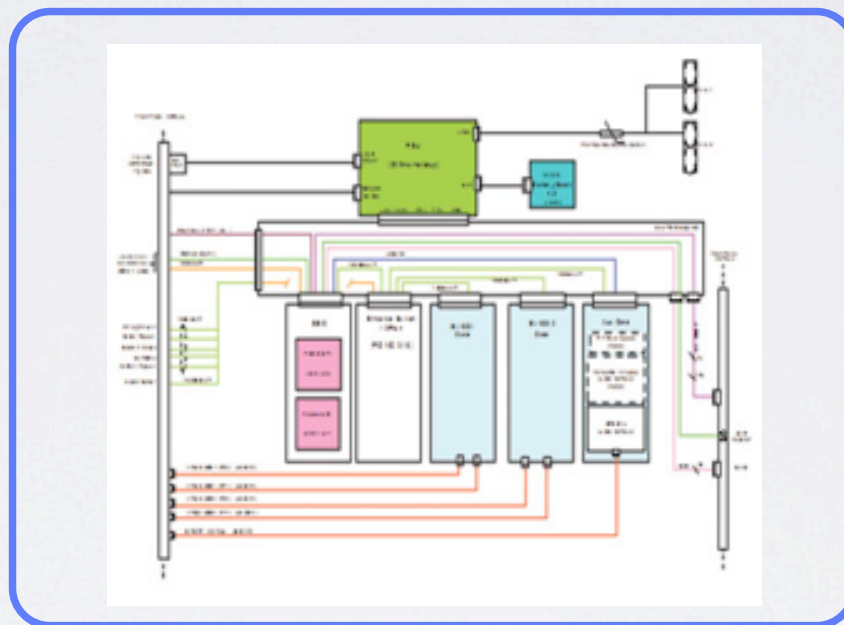
```
End  
Private Sub tbtou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
brwWebBrows  
Case "Home"  
uWebBro
```

automatycznie!



WERYFIKACJA A POSTERIORI

*co odpowiada brawo z ulowym a
Groulo to calkowitym zalaniem to
thingo co bylo w odleglym domu.
w wielkiej prawnie zasady sie na
sukajac w pociadku sposobu na p
rozgerne nakropie. W tej sytuacji a
ci nosy wzgnurayt sie branno spi
nowerze a pomoc.*



automatycznie!



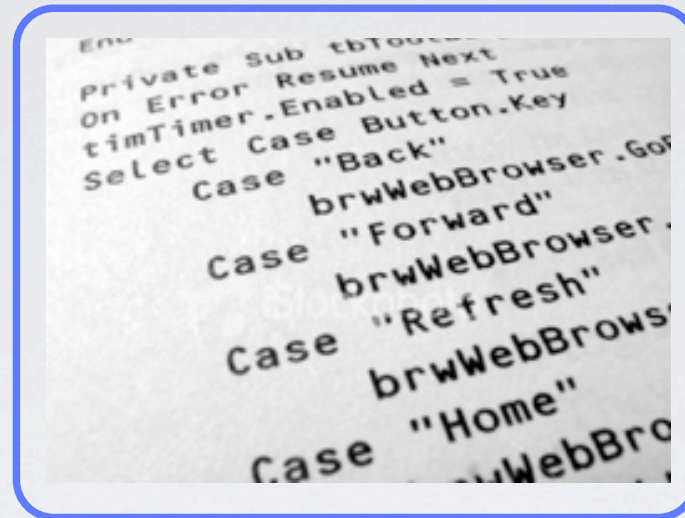
OGRANICZENIE

każde nietrywialne pytanie jest nierozstrzygalne !

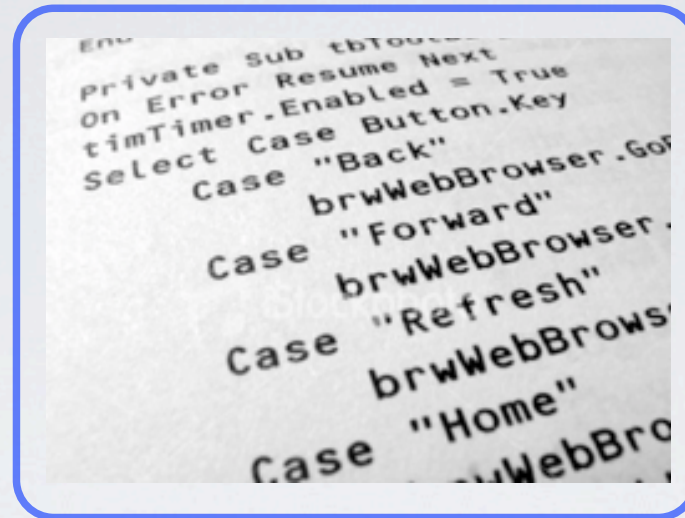
```
End  
Private Sub tblou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
brwWebBrows  
Case "Home"  
uWebBro
```



METODA I: INTERAKCYJNA

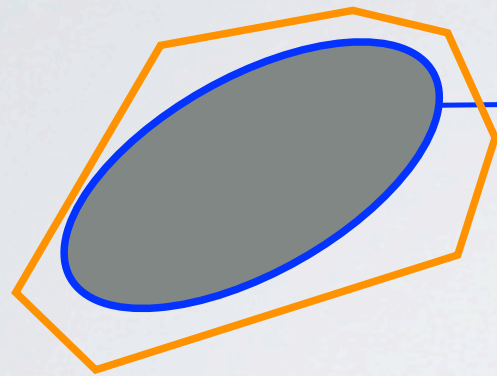


METODA I: INTERAKCYJNA



stosowana w dowodzeniu poprawności programów

METODA 2: PRZYBLIŻENIE

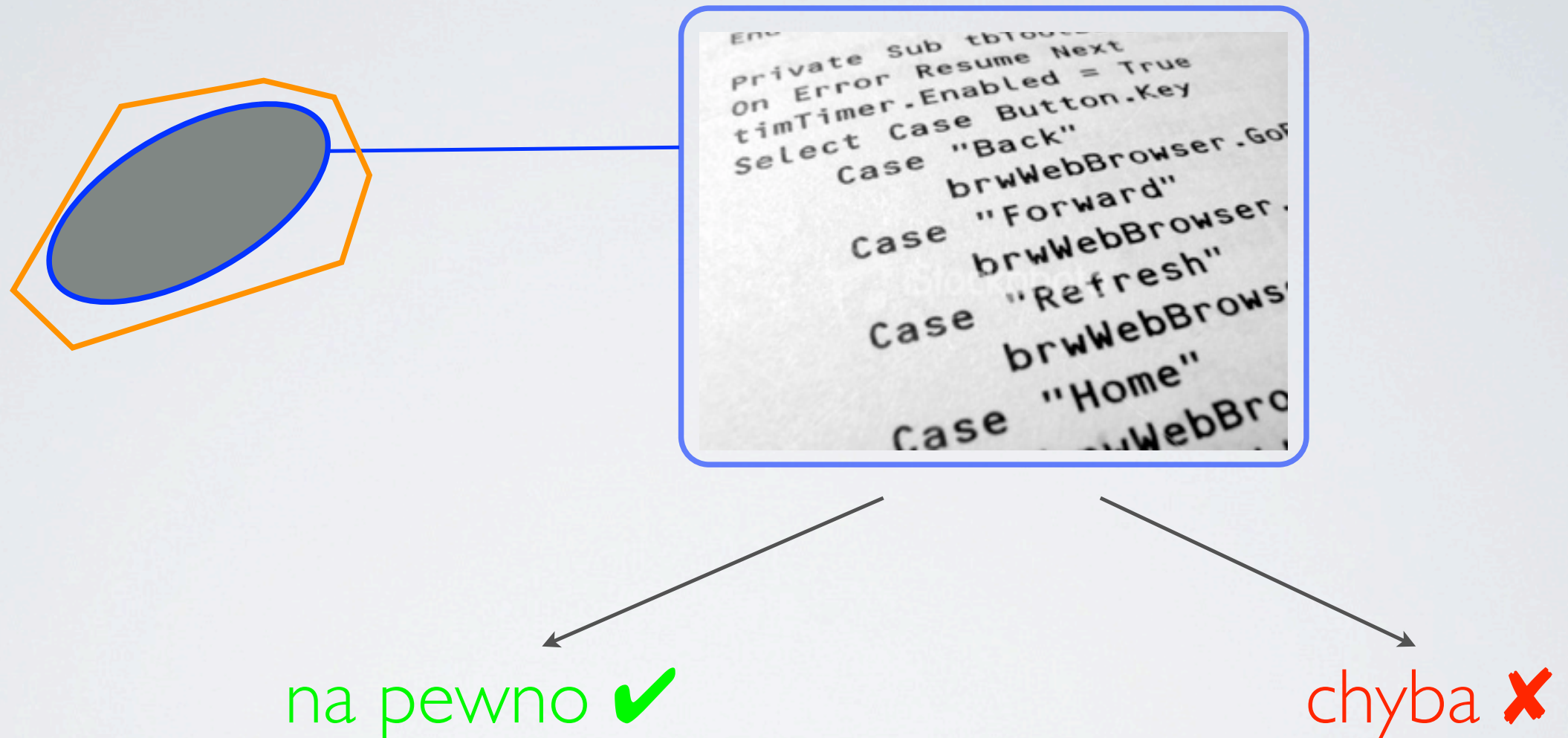


```
End  
Private Sub tbro...  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
    brwWebBrowser.Go...  
Case "Forward"  
    brwWebBrowser...  
Case "Refresh"  
    brwWebBrows...  
Case "Home"  
    brwWebBro...
```

na pewno ✓

chyba ✗

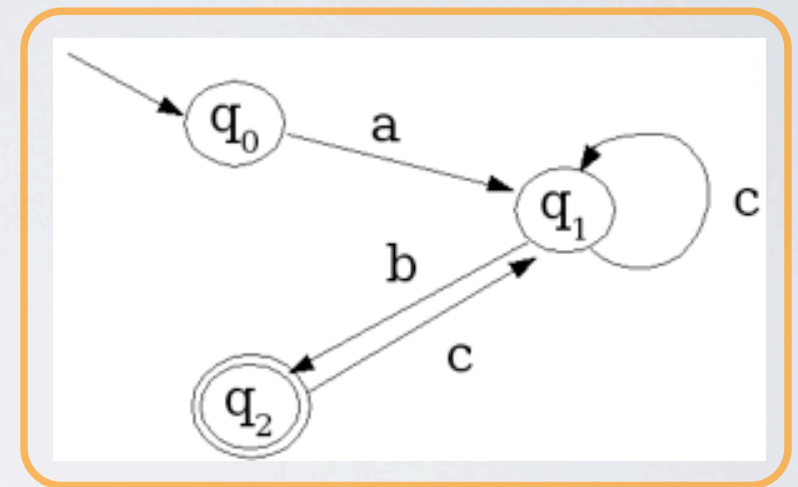
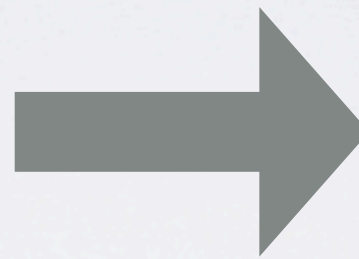
METODA 2: PRZYBLIŻENIE



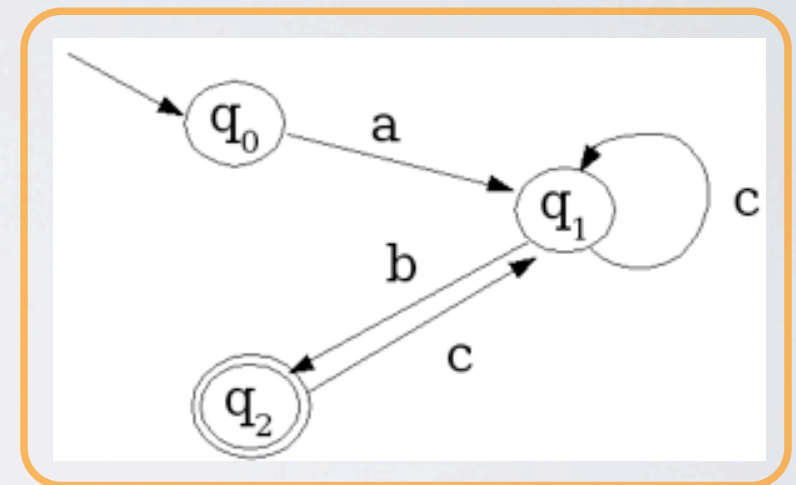
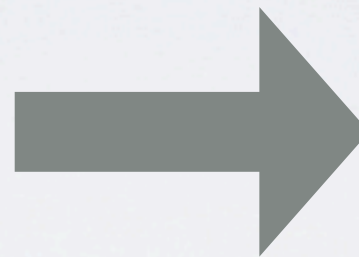
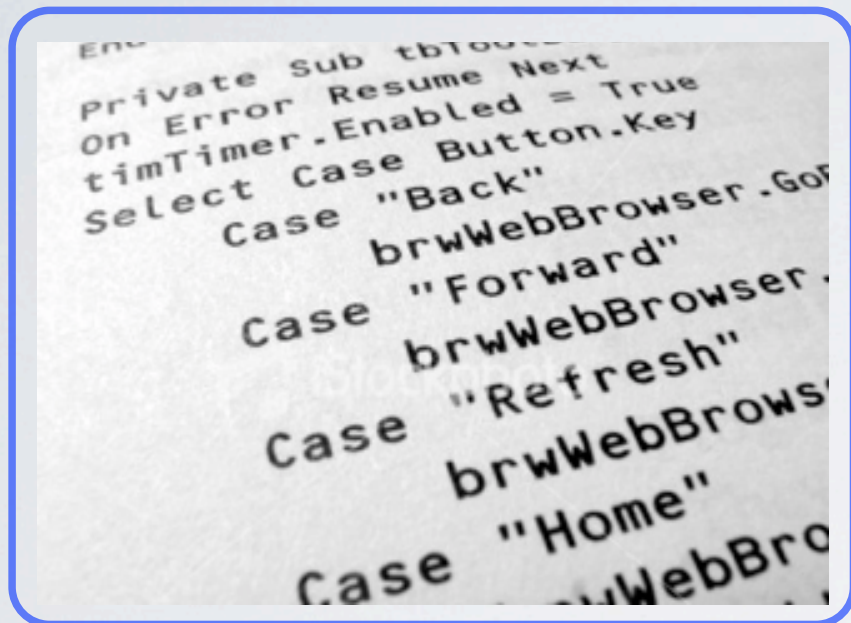
stosowana w statycznej analizie programów

METODA 3: ABSTRAKCIJA

```
End  
Private Sub tblou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
    brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
    brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
    brwWebBrows  
Case "Home"  
    brwWebBro
```



METODA 3: ABSTRAKCJA



stosowana w weryfikacji modelowej

abstrakcja = przybliżenie

OGRANICZENIA

- Metoda 1 (interakcyjna): duży nakład pracy
- Metoda 2 (przybliżenie): fałszywe alarmy
- Metoda 3 (abstrakcja): weryfikujemy nie system, tylko model

MOTTO

Celem formalnej weryfikacji nie jest tworzenie poprawnych systemów komputerowych ...

MOTTO

Celem formalnej weryfikacji nie jest tworzenie poprawnych systemów komputerowych ...
lecz dostarczenie metodologii, która pozwoliłaby zwiększyć ich niezawodność (zmniejszyć liczbę błędów).

WERYFIKACJA A WALIDACJA

co odpowiada błąd z ulotnym a
Groulo to całkowitym zaniem to
thingo to było w odległym domu.
w wielkiej prawie zaczęły się na
sukajac w pójściem sposobu na p
rozjerne nakrycie. W tej sytuacji z
si mozy wyznurzył się francis spi
nowarce z pomocą.

walidacja

```
End  
Private Sub tbtou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
brwWebBrows  
Case "Home"  
uWebBro
```

weryfikacja



WERYFIKACJA A WALIDACJA

do we build the right thing?

co odpowiada błąd z ulotnym a
Groulo to całkowitym zaniem to
things to było w odległym domu.
w wielkiej prawie zaczęły się na
skądaj w pięciu sposobu na p
rozpocznie nakrycie. W tej sytuacji a
ci mogą wyznaczył się Franciszki
nowarce a pomoc.

walidacja

```
End  
Private Sub tblou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
brwWebBrows  
Case "Home"  
uWebBro
```

weryfikacja



WERYFIKACJA A WALIDACJA

do we build the right thing?

co odpowiadać błąd z ulotnym a
Groulo to całkowitym zaniem to
things to było w odległym domu.
w wielkiej prawie zaczęły się na
skądaj w pięciemu sposobu na p
rozpoczyna naktynie. W tej sytuacji a
si moży wyznaczył się brams i pi
nowarce a pomoc.

walidacja

```
End  
Private Sub tbtou  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
brwWebBrows  
Case "Home"  
brwWebBro
```

weryfikacja

do we build the thing right?



WERYFIKACJA FORMALNA

- dowodzenie poprawności programów
- statyczna analiza programów (ang. static analysis)
- weryfikacja modelowa (ang. model-checking)

WERYFIKACJA FORMALNA

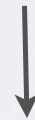
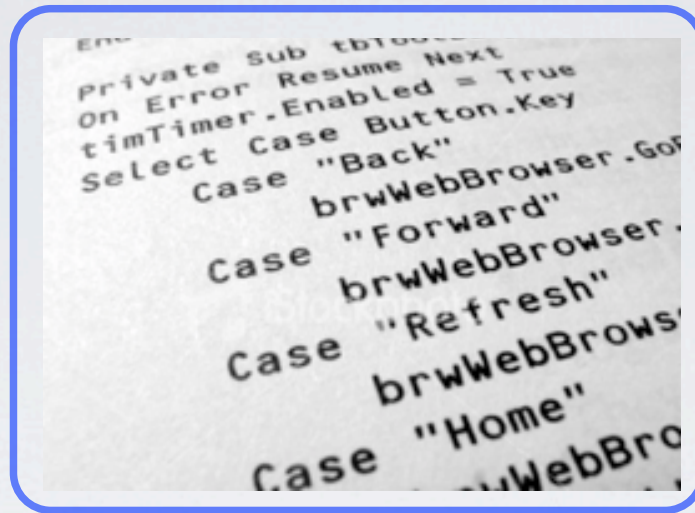
przybliżona

- dowodzenie poprawności programów
- ~~statyczna~~ analiza programów (ang. static analysis)
- weryfikacja modelowa (ang. model-checking)

szersze znaczenie

III. Dowodzenie poprawności programów

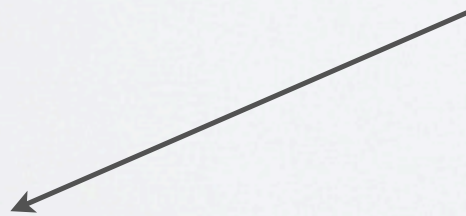
DOWODZENIE POPRAWNOŚCI



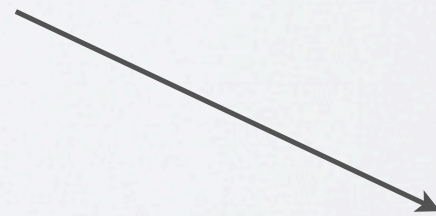
obligacje dowodowe



system wspomagający dowodzenie

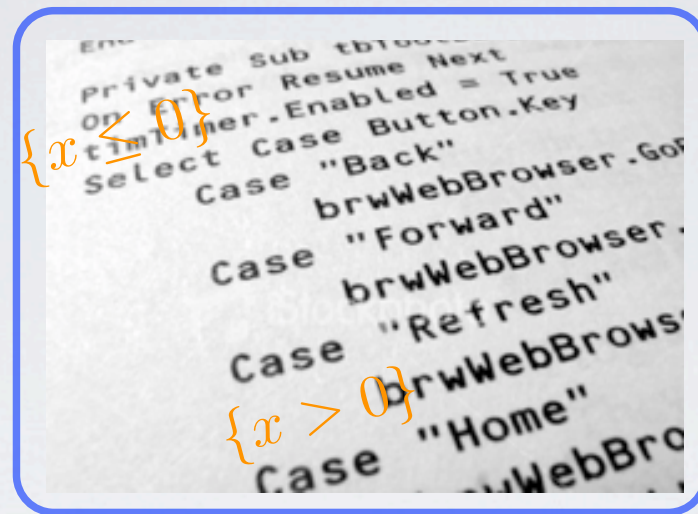


dowód



?

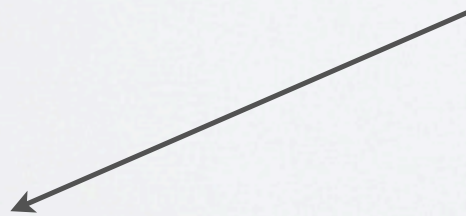
DOWODZENIE POPRAWNOŚCI



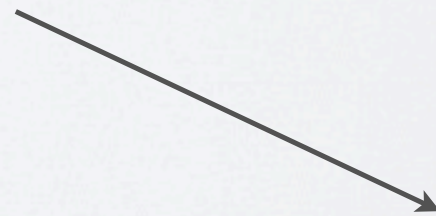
obligacje dowodowe



system wspomagający dowodzenie

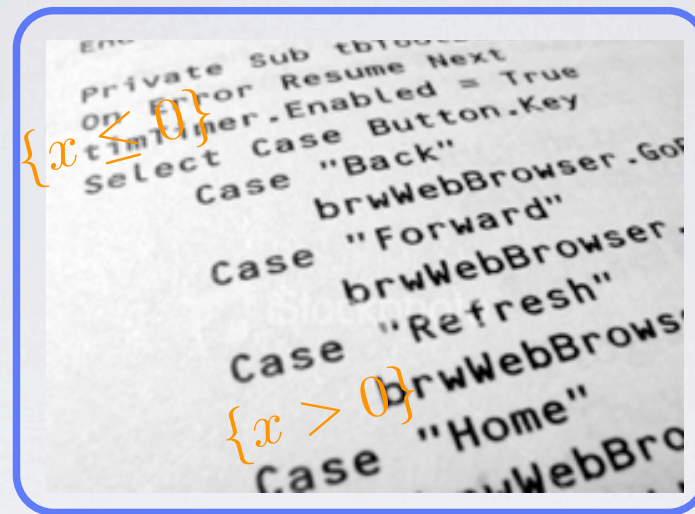


dowód



?

DOWODZENIE POPRAWNOŚCI



obligacje dowodowe

automatycznie
lub
interakcyjnie

system wspomagający dowodzenie

dowód

?

DOWODZENIE POPRAWNOŚCI - CECHY CHARAKTERYSTYCZNE

- analizujemy **udekorowany** program źródłowy
- na ogół tylko częściowo automatycznie
- na ogół konieczny duży nakład pracy specjalisty
- stosowalne do niewielkich programów
- parametryzacja/generalizacja

PIONIERZY



PIONIERZY



Edsger Dijkstra



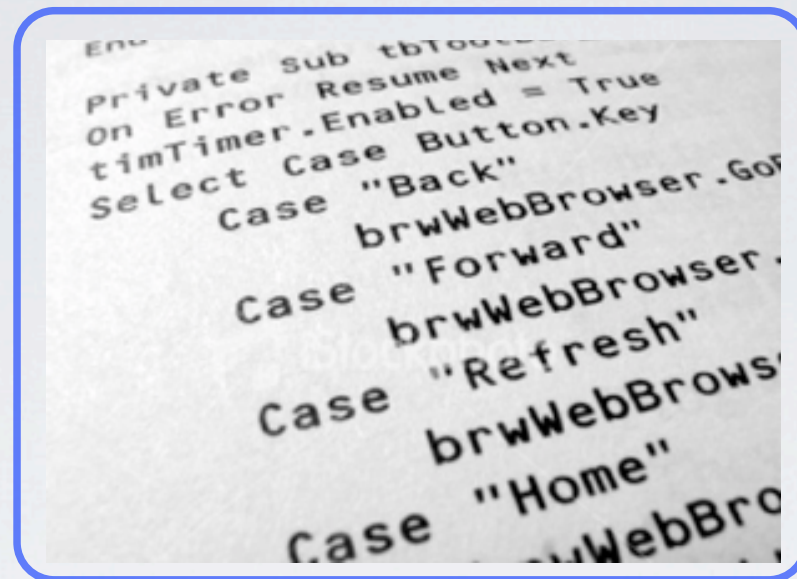
Robert Floyd



C.A.R. Hoare

IV. Statyczna analiza programów

ANALIZA STATYCZNA



analizator statyczny

na pewno ✓

chyba ✗

ANALIZA STATYCZNA - CECHY CHARAKTERYSTYCZNE

- analizujemy program źródłowy ([diagram przepływu sterowania](#))
- analiza przybliżona - fałszywe alarmy (ang. false positives)
- na ogół ukierunkowana na specyficzną własność
- w pełni automatyczna
- stosowalna do programów dużego rozmiaru
- gdy odp. negatywna, informacja diagnostyczna

ANALIZA STATYCZNA - ZASTOSOWANIA

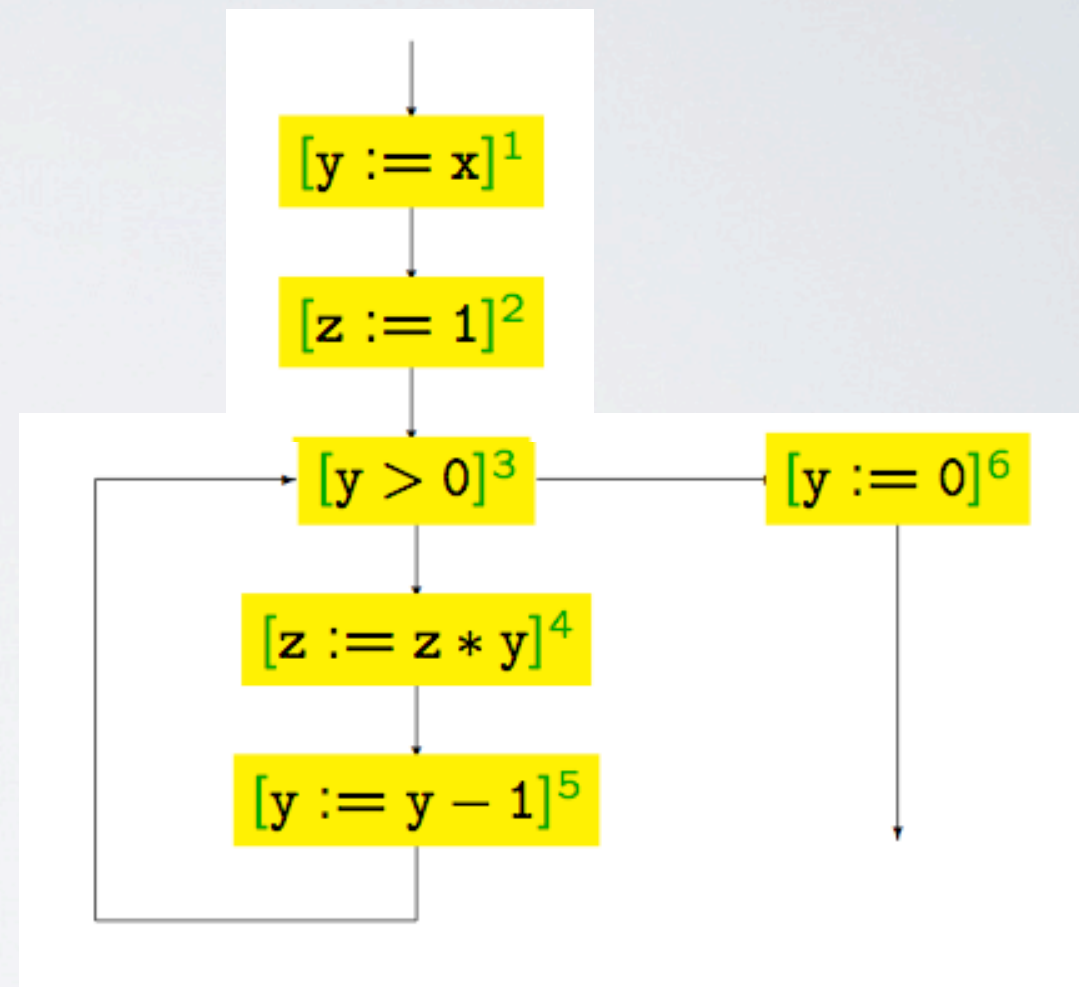
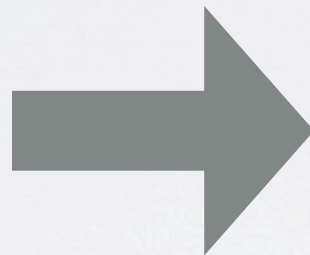
- w optymalizacji kompilacji
- w weryfikacji jakości kodu
- w weryfikacji programów

ANALIZA STATYCZNA - METODY

- analiza przepływu danych
- analiza przepływu sterowania
- analiza typów
- analiza kształtu
- ...
- abstrakcyjna interpretacja

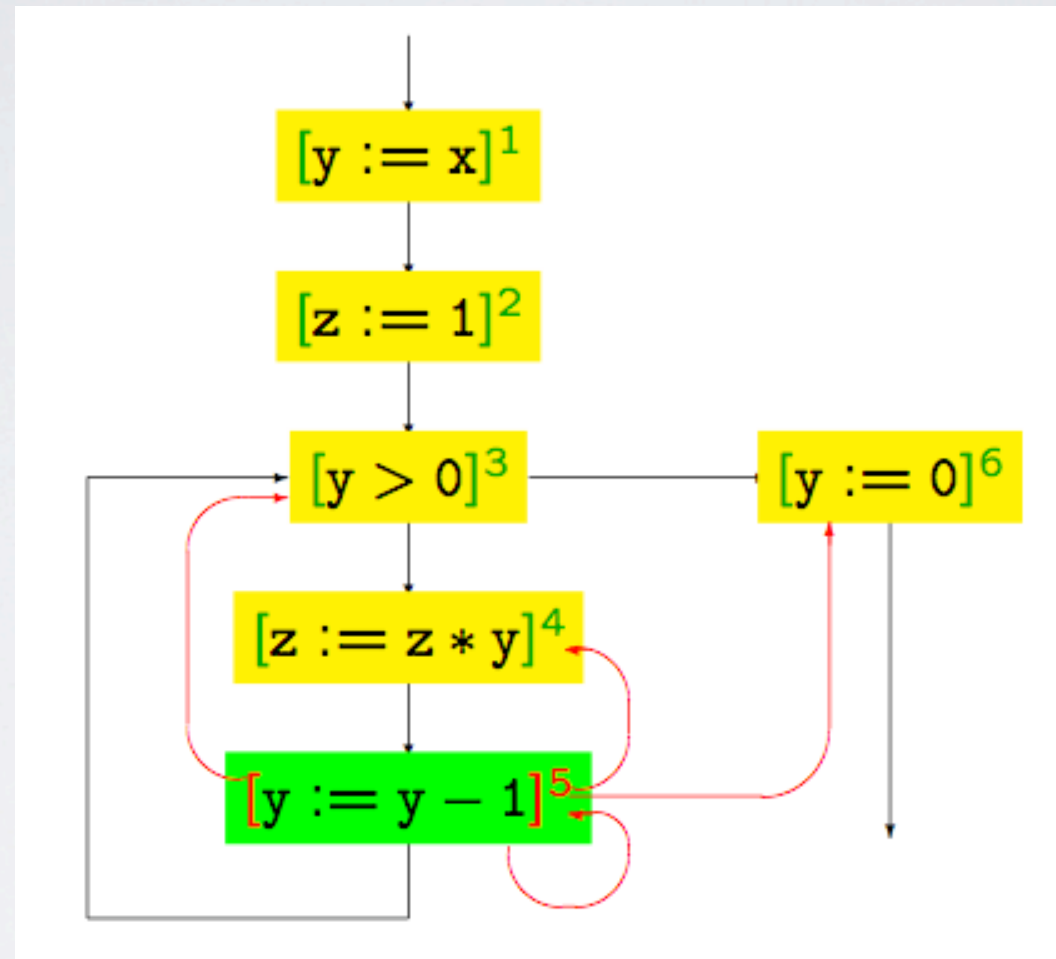
ANALIZA STATYCZNA - PRZYKŁAD

```
[y := x]1;  
[z := 1]2;  
while [y > 0]3 do  
  [z := z * y]4;  
  [y := y - 1]5  
od;  
[y := 0]6
```



[Nielson, Nielson, Hankin 2005]

„DOCIERAJĄCE” PRZYPISANIA



[Nielson, Nielson, Hankin 2005]

„DOCIERAJĄCE” PRZYPISANIA

	←	{(x, ?), (y, ?), (z, ?)}
[y := x] ¹ ;	←	{(x, ?), (y, 1), (z, ?)}
[z := 1] ² ;	←	{(x, ?), (y, 1), (y, 5), (z, 2), (z, 4)}
while [y > 0] ³ do	←	{(x, ?), (y, 1), (y, 5), (z, 2), (z, 4)}
[z := z * y] ⁴ ;	←	{(x, ?), (y, 1), (y, 5), (z, 2), (z, 4)}
[y := y - 1] ⁵	←	{(x, ?), (y, 1), (y, 5), (z, 2), (z, 4)}
od;	←	{(x, ?), (y, 1), (y, 5), (z, 2), (z, 4)}
[y := 0] ⁶	←	{(x, ?), (y, 6), (z, 2), (z, 4)}

[Nielson, Nielson, Hankin 2005]

„DOCIERAJĄCE” PRZYPISANIA

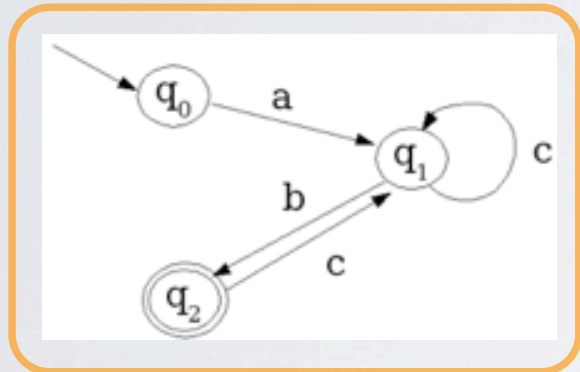
- formalizujemy problem jako układ równań
- najmniejsze rozwiązanie
- algorytm iteracyjny

V. Weryfikacja modelowa

WERYFIKACJA MODELOWA

```
Private Sub tbtb...  
On Error Resume Next  
timTimer.Enabled = True  
Select Case Button.Key  
Case "Back"  
    brwWebBrowser.Go  
Case "Forward"  
    brwWebBrowser.  
Case "Refresh"  
    brwWebBrows  
Case "Home"  
    brwWebBro
```

*co odpowiada brzo z ulownym
Grosito to sathswitym zalaniem to
tkiego co bylo w odkrytym domu.
w wielkiej granice sacoty sie na
sakajac w pispiedu sposobu na p
zorysme nakonyie. W tej sytuacji z
si mozy wymurzyt sie Franus spi
nowerze z pomoca.*



$$\exists x((\forall y \exists z \leq x) y \in X)$$

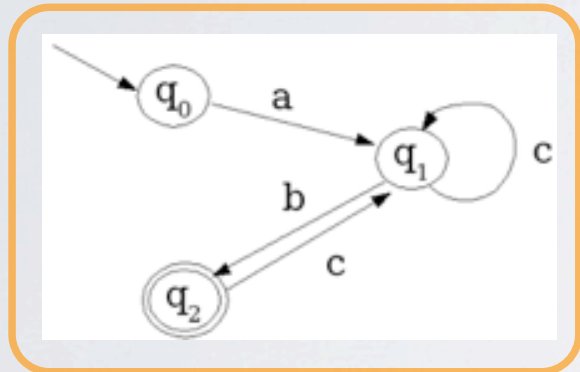
weryfikator modelowy



kontrprzykład

błąd

WERYFIKACJA MODELOWA



$$\exists x((\forall y \exists z \leq x) y \in X)$$

weryfikator modelowy



kontrprzykład

błąd

WERYFIKACJA MODELOWA

- model M - **możliwe** zachowania systemu
- specyfikacja własności Φ - **dopuszczalne** zachowania systemu
- automatycznie sprawdzamy, czy

M spełnia Φ

PRZYKŁADOWE WŁASNOŚCI

- **bezpieczeństwo**: wszystkie stany osiągalne spełniają ϕ
- **żywołność**: zawsze osiągniemy stan, który spełnia ϕ
- **sprawiedliwość**: ϕ będzie spełnione nieskończenie wiele razy

NAGRODA TURINGA 2007



NAGRODA TURINGA 2007



Ed Clarke



Allen Emerson



Joseph Sifakis

NAGRODA TURINGA 2007



Ed Clarke



Allen Emerson



Joseph Sifakis



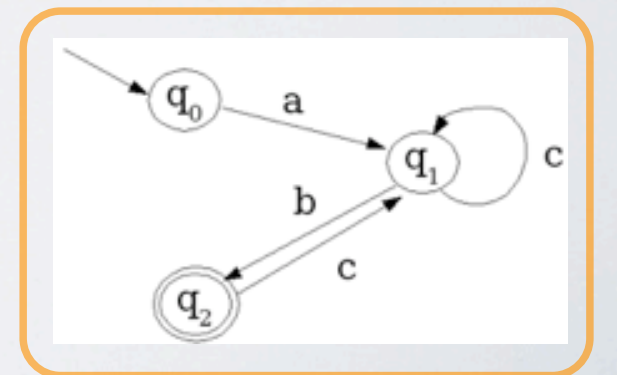
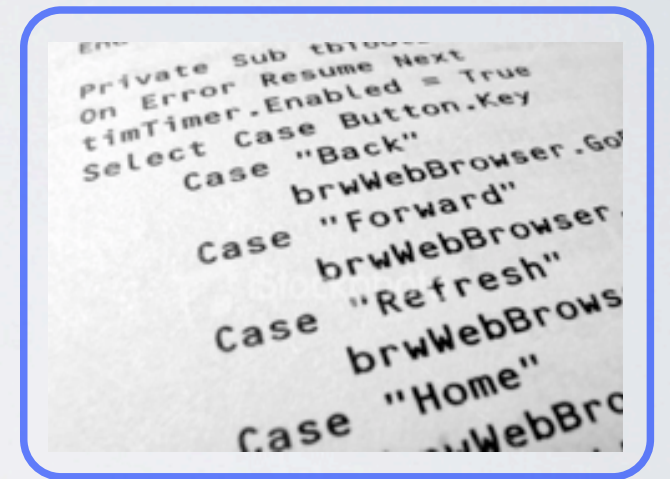
1972, 1978, 1980

WERYFIKACJA MODELOWA - CECHY CHARAKTERYSTYCZNE

- model systemu (**graf stanów**)
- analiza poprzez przeszukiwanie wszystkich przebiegów (zachowań) modelu
- specyfikacja wymagań = formuła temporalna
- metoda (**prawie**) w pełni automatyczna
- stosowalna do programów średniego rozmiaru
- gdy odp. negatywna, informacja diagnostyczna - **kontrprzykład**

OD SYSTEMU DO MODELU

- tylko częściowo automatycznie
- kluczowy jest odpowiedni wybór poziomego abstrakcji
- weryfikujemy nie system, lecz jego model!

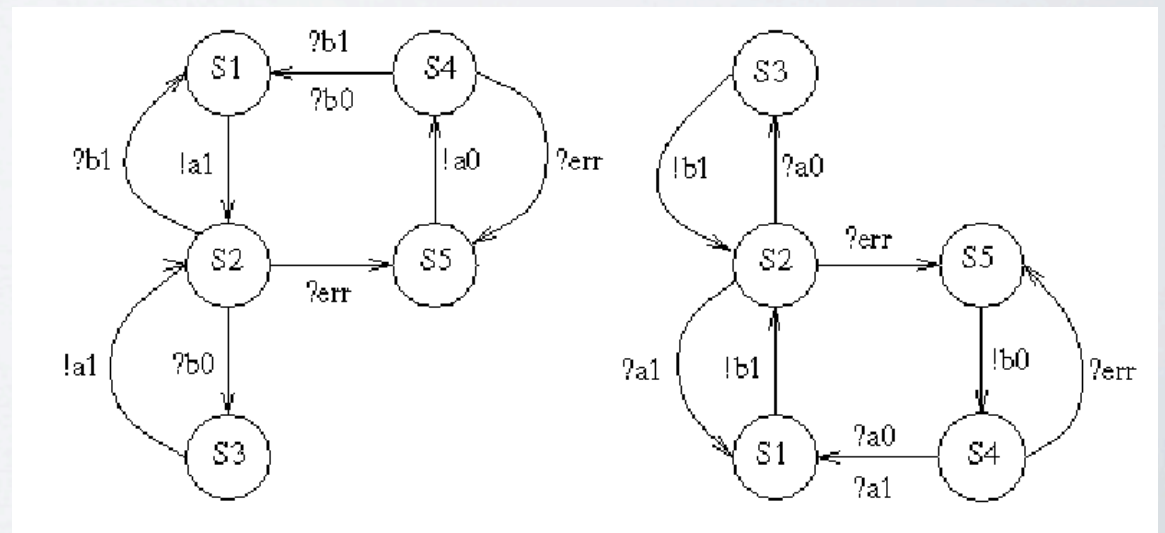


JAKI MODEL?

- funkcyjny (relacyjny): dane/wynik
- reaktywny:
 - interakcja z otoczeniem
 - działanie może się nie kończyć

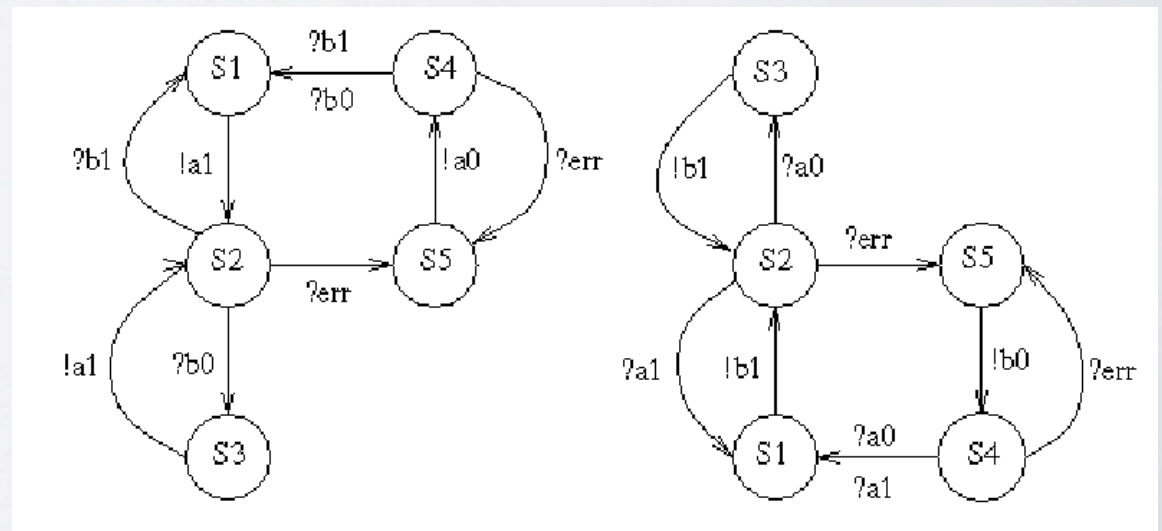
MODEL = STEROWANIE + INTERAKCJA

- brak skomplikowanych danych i obliczeń na nich
- abstrakcyjny (**niedeterminizm**)
- kompozycyjalny
- współbieżność, interakcja między składowymi (**niedeterminizm**)



STAN

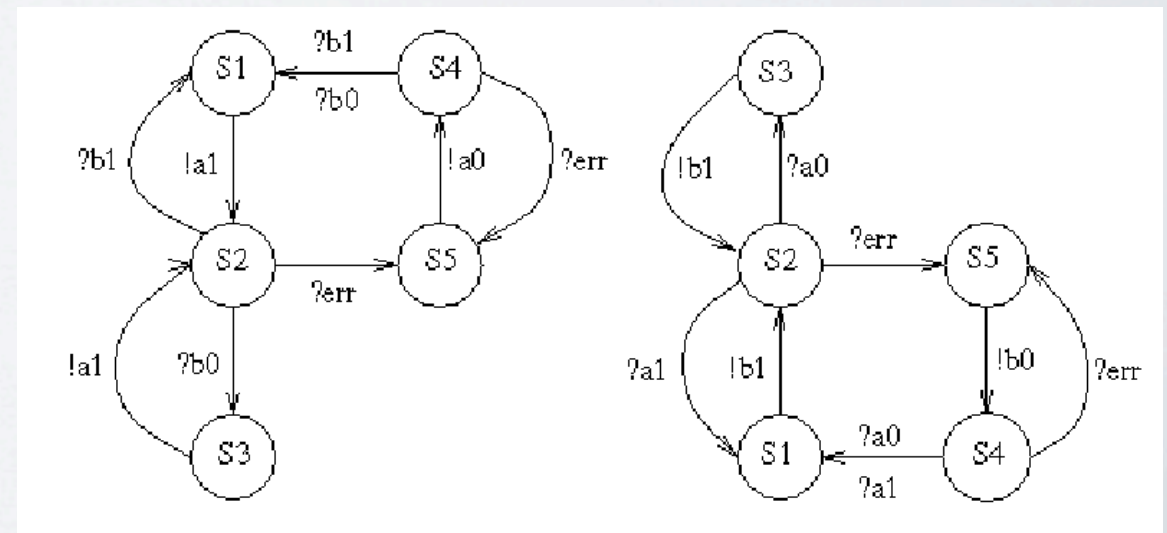
- stan lokalny = punkt sterowania +
 - wartości zmiennych +
 - zawartość kanałów komunikacyjnych +
 - ...
- stan globalny = stany lokalne + ...



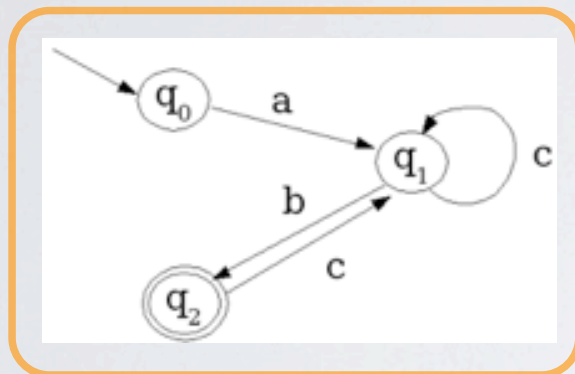
EKSPLOZJA STANÓW



$$G = L_1 \times \dots \times L_n$$



WERYFIKACJA MODELOWA



$$\exists X((\forall x \exists y \leq x y \in X))$$

weryfikator modelowy



brak zasobów!

kontrprzykład

błąd

NIE TYLKO OPROGRAMOWANIE

- sprzęt (NuSMV)
- protokoły, oprogramowanie systemowe, sterowniki (Spin)
- oprogramowanie (CBMC, Java Pathfinder)
- systemy zależne od czasu (UPPAAL)
- systemy probabilistyczne (PRISM)

VI. Historia

PREHISTORIA

- Goldstine, v. Neumann (1947), Turing (1949) } diagramy, asercje
- Floyd (1967), Hoare (1969), Dijkstra (1976)
- Pratt, Harel (1976-79): logika dynamiczna programów
- Owicki, Gries (1976): logika Hoare'a dla programów współb.
- Kamp (1968): LTL, Pnueli (1977): zastosowanie w weryfikacji
- lata 70': analiza statyczna w optymalizacji kompilacji
- (1979) lint - analiza statyczna programów w C
- (1971) Boyer-Moore theorem prover

PREHISTORIA

- Goldstine, v. Neumann (1947), Turing (1949) } diagramy, asercje
- Floyd (1967), Hoare (1969), Dijkstra (1976)
- Pratt, Harel (1976-79): logika dynamiczna programów
- Owicki, Gries (1976): logika Hoare'a dla programów współb.
- Kamp (1968): LTL, Pnueli (1977): zastosowanie w weryfikacji
- lata 70': analiza statyczna w optymalizacji kompilacji
- (1979) lint - analiza statyczna programów w C
- (1971) Boyer-Moore theorem prover



nagroda Turinga 1996

HISTORIA (LATA 80')

- Clarke, Emerson (1980), Ben-Ari, Manna, Pnueli (1981): CTL*
- Clarke, Emerson (1981), Queille, Sifakis (1982): [narodziny weryfikacji modelowej](#)
- EMC: kilkadziesiąt tysięcy stanów
- (pocz. lat 80') weryfikacja kompozycyjalna: „assume-guarantee”
- lata 80': systemy wspomaganie dowodzenia i ich zastosowanie w weryfikacji:
 - Boyer-Moore, Isabelle, HOL, PVS, Coq, Mizar, ...

HISTORIA (LATA 90')

- Clarke, McMillan, i inni (1988-1990): **symboliczna weryfikacja modelowa** oparta na BDD
 - SMV: 10^{20} ... 10^{50} stanów (układy sprzętowe)
- (1994-95) narzędzia komercyjne:
 - systemy wspom. dowodzenia, weryfikatory modelowe
- (1998-99) **ograniczona weryfikacja modelowa** oparta na SAT
- lata 90': systemy wspomaganie dowodzenia - dalszy rozwój:
 - Boyer-Moore, Isabelle, HOL, PVS, Coq, Mizar, ...

HISTORIA (LATA 00')

- rozwój metod opartych na SAT i na SMT
- weryfikacja modelowa oprogramowania (abstrakcje)
- narzędzia (przykładowe, dla języków C i Java):
 - dowodzenie poprawności: ESC/Java2, KeY
 - analiza statyczna: FindBugs, PMD, Splint, Coverity, SLAM
 - weryfikacja modelowa: CBMC, Java Pathfinder, Bandera, Bogor, BLAST, Magic
- systemy zależne od czasu i probabilistyczne
- nowe zastosowania, np. w bioinformatyce

VII. Podsumowanie

GRANICE

- podział nie jest sztywny
- metody stosujące łącznie weryfikację modelową, analizę statyczną i/lub dowodzenie poprawności
- weryfikacja modelowa programów (ang. software model checking)
- wstępna analiza statyczna przed weryfikacją modelową
- weryfikacja modelowa jako dowodzenie poprawności
- ...

OGRANICZENIA

- weryfikacja na ogół częściowa
- błędy w narzędziach lub w specyfikacji

INNE METODY

- dynamiczna analiza programów
- testowanie / symulacja, miary pokrycia testami, ...
- metryki jakości kodu źródłowego (zarządzanie jakością kodu)
- audyt kodu źródłowego
- systematyczna konstrukcja poprawnych programów
- ...

PODSTAWY TEORETYCZNE

- logika, teoria mnogości (twierdzenia o punktach stałych)
- teoria automatów
- modele współbieżności
- algorytmy grafowe

CZEGO NIE BĘDZIE?

- dostawanie ogólnej metodologii do specyfiki zastosowań
- włączenie weryfikacji formalnej do procesu tworzenia systemów komputerowych
- zarządzanie procesem weryfikacji
- zastosowania do rzeczywistych systemów
- heurystyki dla wydajności
- ...

PORÓWNIANIE

- dowodzenie poprawności programów
- analiza statyczna programów
- weryfikacja modelowa

PORÓWNIANIE

parametryzacja

praca eksperta

precyzja

- dowodzenie poprawności programów
- analiza statyczna programów
- weryfikacja modelowa

szybkość

fałszywe alarmy

pełna automatyczność

współbieżność

eksplozja stanów

układy sprzętowe