

# **Wykorzystanie systemów regułowych do implementacji mechanizmu obsługi zdarzeń.**

Kajetan Rzepecki

EIS 2014

14 stycznia 2015

# 1 Wstęp

Celem projektu jest zbadanie możliwości oraz opłacalności implementacji mechanizmu obsługi zdarzeń w systemie programistycznym z wykorzystaniem systemów regułowych z **wnioskowaniem w przód**.

Mechanizm ów ma za zadanie ułatwić obsługę zdarzeń zachodzących w systemie poprzez umożliwienie definiowania reguł i faktów w sposób deklaratywny i zintegrowany ze składnią i semantyką języka programowania, w którym jest wykorzystywany:

```
(assert!  
  (predicate subject object) ;; Dodanie faktu do bazy faktów.  
  ...)  
  
(whenever rule                ;; Dodanie reguły reprezentującej zdarzenie  
  action                      ;; oraz instrukcji je obsługujących do  
  ...)                       ;; bazy faktów.  
  
(declare (foo x y)           ;; Deklaracja funkcji, zawierająca  
  (_@ a function)           ;; automatycznie inferowane fakty  
  (_@ arity 2)              ;; dotyczące funkcji,  
  (@ big-oh 1)              ;; dodatkowe fakty dostarczone przez autora oraz  
  (@ equal (foo 2 21) 23))  ;; informacje o kontraktach funkcji.  
  
(define (foo x y)  
  (+ x y))
```

## 2 Analiza problemu

Mechanizm obsługi zdarzeń będzie docelowo wykorzystywany w zastosowaniach Internet of Things - środowisku rozproszonym z wysoką redundancją, gdzie wiele węzłów tworzących klaster udostępnia zbliżone funkcjonalności o nieco różnych charakterystykach.

Na potrzeby projektu, węzłem określaną będzie instancja maszyny wirtualnej języka programowania, na której dostępne są **moduły** - zbiory funkcji realizujących jakąś funkcjonalność. Dynamicznie łączące i rozłączające się węzły będą generowały zdarzenia (indukowane przez i składające się z elementarnych operacji modyfikacji bazy faktów) takie jak: połączenie nowego węzła, pojawienie się nowego modułu, czy dowolne zmiany zawarte w kodzie przez programistę. Zdarzenia te będą przesyłane do pozostałych połączonych węzłów.

Dzięki zastosowaniu systemu regułowego, moduły wchodzące w skład danego węzła będą mogły reagować na napływające zdarzenia odpowiednio modyfikując swoje zachowanie. W celu obsługi danego zdarzenia definiowana będzie reguła (o dowolnej złożoności), która w momencie spełnienia uruchamiała będzie szereg instrukcji obsługujących zdarzenie.

Wykorzystanie wnioskowania w przód umożliwi definiowanie reguł z wyprzedzeniem - powiązane z nimi instrukcje obsługujące zdarzenie zostaną wykonane dopiero w momencie spełnienia reguły, po dostatecznej modyfikacji bazy faktów.

## 2.1 Przykład zastosowania proponowanego mechanizmu

Posiadając następujący moduł pobierający dane GPS z czujnika:

```
(define-module gps-default
  (provide gps)

  (declare (get-location)
    (@ tolerance 0.01))

  (define (get-location)
    ;; Code that gets current location.
    ))
```

...oraz następującą aplikację z niego korzystającą:

```
(define-module gps-app
  (import 'gps-default)

  (define (use-gps-data)
    (let ((curr-location (gps-default:get-location)))
      ;; Use gps function to do something.
    ))

  (define (update-state)
    ;; Update apps state using latest gps data.
    ))
```

...programista jest w stanie zadeklarować obsługę pojawienia się modułu pobierającego dane GPS z większą dokładnością:

```
(define-module gps-app
  (import 'gps-default)

  (define gps-location-function gps-default:get-location)

  (whenever (and (module-loaded ?node ?module)
    (declares ?module ?function)
    (name ?function 'get-location)
    (tolerance ?function ?tol)
    (< ?tol 0.01))
    (set! gps-location-function ?node:?module:?function)
    (update-state))

  (define (use-gps-data)
    (let ((curr-location (get-location-function)))
      ;; Use gps function to do something.
    ))

  (define (update-state)
    ;; Update apps state using latest gps data.
    ))
```

...dzięki czemu, po podłączeniu węzła udostępniającego następujący moduł:

```
(define-module gps-vendor
  (provide gps)

  (declare (get-location)
    (@ tolerance 0.0001))

  (define (get-location)
    ;; Code that gets current location.
  ))
```

...system działający na dotychczasowym węźle automatycznie będzie wyświetlał dane z większą dokładnością.

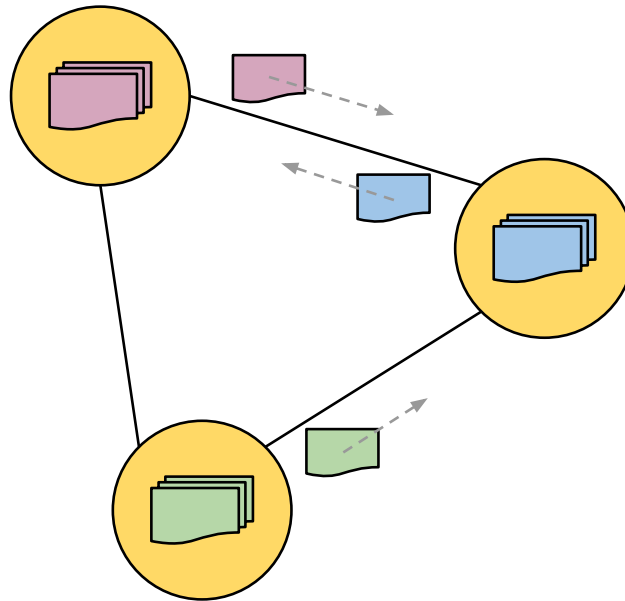
## 2.2 Analiza możliwości implementacji i przydatności

Przydatność proponowanego mechanizmu jest potencjalnie nieoceniona w domenie języków programowania ponieważ umożliwia ekspresję złożonego przepływu sterowania w deklaratywny sposób - za pomocą krótkich, dobrze zdefiniowanych reguł. Dzięki temu programista tworzący aplikacje wykorzystując system regułowy może skoncentrować się na rezultatach rozwiązania problemu, nie zaś na sposobie ich osiągnięcia - system regułowy zrobi to za niego.

Wykorzystanie systemów regułowych do implementacji systemu modułów języka programowania dodatkowo umożliwia automatyczne i skalowalne tworzenie rozproszonych, dynamicznych systemów charakteryzujących się dużą redundancją - takich jak Internet of Things. Podejście regułowe zapewnia interfejs komunikacji i mechanizm rozwiązywania konfliktów między poszczególnymi modułami/jednostkami aplikacji, co ułatwia ich kompozycję i umożliwia redundancję.

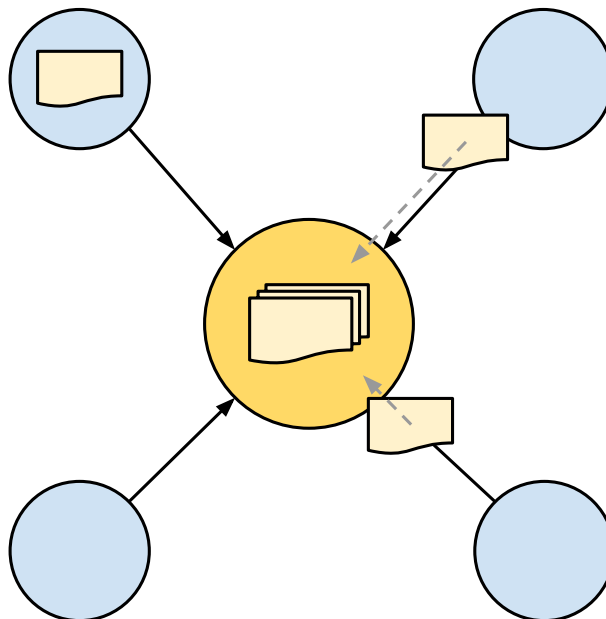
Dodatkowym atutem zastosowania systemów regułowych jest potencjalna skalowalność systemów z nich korzystających - do systemu w każdym momencie można dodać więcej węzłów dostarczających pewne usługi, a system automatycznie będzie w stanie z nich korzystać, reagować na zmiany ich stanu i obsługiwać zdarzenia przez nie sygnalizowane. Zwiększenie ilości węzłów dostarczających te same usługi pozytywnie wpływa także na stabilność i bezpieczeństwo działania systemu dzięki zwiększeniu jego redundancji.

Potencjalne zalety wykorzystania systemów regułowych w systemach rozproszonych szczególnie dobrze widać w idealnym przypadku zaprezentowanym na poniższym diagramie, gdzie każdy węzeł zawiera pewne reguły i generuje zdarzenia przesyłane do pozostałych węzłów systemu:



Taka konfiguracja zapewnia wszystkie opisane powyżej zalety kosztem zasobów wymaganych do implementacji i działania systemów regułowych na każdym węźle.

W przypadku Internet of Things mały rozmiar i ograniczona wydajność pamięciowa/obliczeniowa urządzeń wchodzących w jego skład niestety uniemożliwia stosowanie istniejących, profesjonalnych systemów regułowych w celu implementacji powyższej, idealnej konfiguracji prowadząc do następującego układu:



W tej konfiguracji istnieją dwie klasy węzłów:

- węzły regułowe, których oprogramowanie korzysta z systemów regułowych do obsługi zdarzeń,
- węzły zdarzeniowe, które jedynie generują zdarzenia i przesyłają je do węzłów regułowych systemu.

Ponieważ węzły zdarzeniowe nie umożliwiają definicji reguł, są one zdane na alternatywne, często imperatywne i mało skalowalne sposoby obsługi zdarzeń, istotnym jest więc by proponowany w następujących sekcjach mechanizm obsługi zdarzeń charakteryzował się możliwie niskim narzutem wydajnościowym.

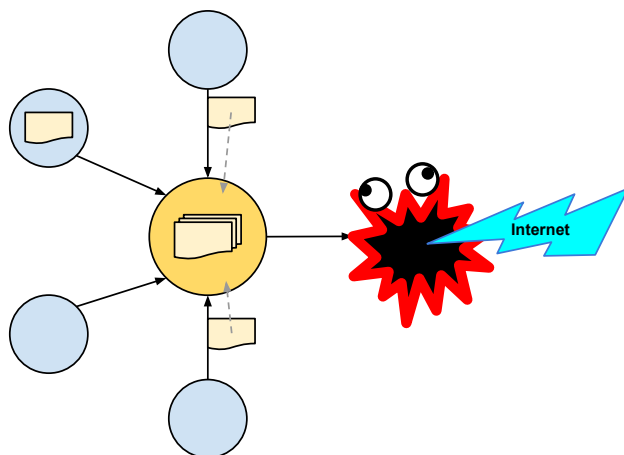
## 2.3 Podobne rozwiązania

Systemy regułowe wykorzystywane są w wielu różnych dziedzinach, przede wszystkim w systemach ekspertowych do przechowywania i manipulowania wiedzy.

Kluczowym przykładem jest system CLIPS, charakteryzujący się elastycznością - jest on narzędziem do budowy systemów ekspertowych umożliwiającym osadzenie go w gotowej aplikacji. Nie posiada on jednak wszystkich aspektów języka programowania ogólnego przeznaczenia, przez co jego wykorzystanie nie jest dogodne.

Następnym przykładem wykorzystania systemów regułowych do obsługi zdarzeń jest pakiet Drools Fusion, wykorzystujący reguły oraz arbitralny kod w języku Java w kontekście systemów reguł biznesowych (BRMS). Ponieważ jest to system *profesjonalny* i skierowany do dużych korporacji, jest on bardzo rozległy i posiada bardzo wiele, niekoniecznie pożądanych funkcjonalności, przez co jego wykorzystanie w projekcie również nie jest dogodne.

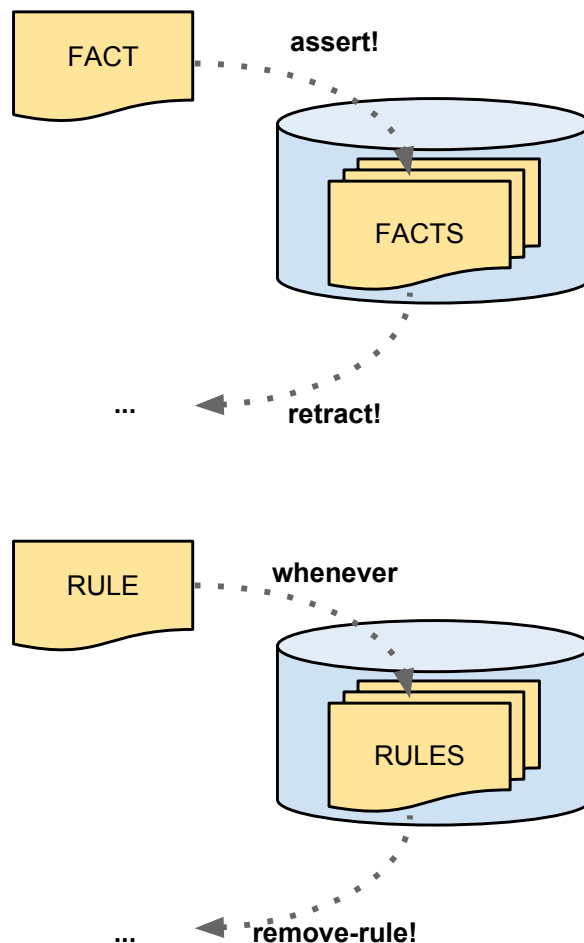
W domenie Internet of Things również powstają rozwiązania oparte o systemy regułowe. Przykładem jest system zaproponowany przez firmę Bosh, który umożliwia zarządzanie inteligentnymi, podłączonymi do IoT urządzeniami z wykorzystaniem reguł. Niestety, jest to system komercyjny i scentralizowany, przez co traci on wiele z zalet zapewnianych przez systemy regułowe:



Klienci mają jedynie możliwość pośredniej ingerencji w tzw. CCU, które są odpowiednikami węzłów regułowych opisanych powyżej. Reguły w CCU modyfikowane są przez zewnętrzny serwis operujący w *Chmurze*, od którego zależy cały budowany system.

## 3 Szkic rozwiązania

W celu realizacji projektu niezbędne będzie zaimplementowanie dwóch struktur danych, **fact store** oraz **rule store**, które będą odpowiedzialne za przechowywanie odpowiednio faktów i reguł w systemie. Na poniższym diagramie przedstawiono obie struktury danych oraz ich interfejsy:



**Fact store** umożliwia dodawanie nowych faktów przez **assert!** oraz usuwanie istniejących faktów przez **retract!**. Dodatkowo, możliwe jest sygnalizowanie zdarzeń poprzez **signal!**, które jest złożeniem **assert!** i **retract!**

**Rule store** umożliwia definiowanie nowych reguł poprzez konstrukcję **whenever** oraz ich usuwanie przez **remove-rule!**. Dodatkowo, możliwe jest czasowe ograniczenie reguł wykorzystując inne konstrukcje języka oraz podstawowe operacje, jak **whenever** i **remove-rule!**.

Powyższy protokół jest dostatecznie elastyczny, by umożliwić różne implementacje systemu regułowego i jednocześnie na tyle ekspresywny, by umożliwić w prosty sposób obsługę złożonych zdarzeń w systemie.

### 3.1 Porównanie różnych algorytmów

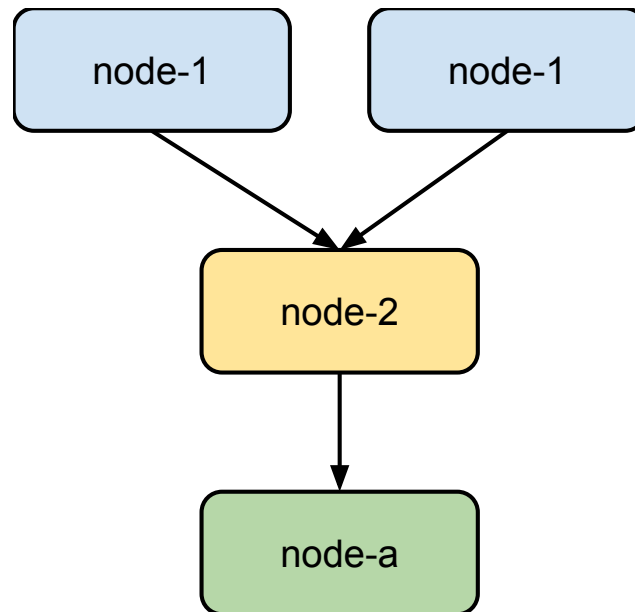
Najłatwiejszą implementacją powyższego protokołu jest naiwne podejście iteracyjne polegające na iteracyjnym sprawdzaniu każdego faktu z każdą regułą. Rozwiązanie to, mimo że jest proste, jest również bardzo niewydajne - złożoność obliczeniowa rzędu  $O(RF^P)$ , dla  $R$  reguł,  $F$  faktów i  $P$  średniej ilości wzorców przypadających na lewą stronę reguły.

Standardowym podejściem jest wykorzystanie algorytmu **Rete** - zaprojektowanego w roku 1974 przez dr Charles'a Forgy'iego, który charakteryzuje się znacznie lepszą złożonością obliczeniową - rzędu  $O(RFP)$  kosztem zwiększonego wykorzystania pamięci. Algorytm ten jest relatywnie nieskomplikowany i jednocześnie zadowalająco wydajny.

Istnieją także wersje zrównoleglone algorytmu Rete, opisane szeroko w *Parallel Algorithms and Architectures for Rule-Based Systems*, jednak owe algorytmy są zbyt skomplikowane na potrzeby projektu.

## 3.2 Rete

W związku z powyższym, zdecydowano się na implementację podstawowej wersji algorytmu Rete. Algorytm Rete polega na budowie sieci reguł złożonej z węzłów należących do jednej z kilku kategorii przedstawionych na poniższym diagramie:



Węzły kategorii **node-1**, zwane także węzłami alfa, to proste węzły dopasowujące fakty do wzorców obecnych w regułach, np. `(provides ?x ?y)`. Posiadają one jedno wejście i potencjalnie wiele wyjść.

Węzły kategorii **node-2**, zwane także węzłami beta, lub *join-nodes* posiadają pamięć faktów i służą do unifikacji faktów pochodzących z dwóch wejść. Wynikiem ich działania jest szereg zunifikowanych faktów, pasujących do obu gałęzi sieci prowadzących do obecnego węzła.

Węzły kategorii **node-a** to węzły akcji, które przechowują prawe strony reguł i posiadają tylko jedno wejście - wynik działania sieci Rete prowadzący do uruchomienia danej produkcji.

Powyższe kategorie to tylko trzy podstawowe rodzaje węzłów, można wyróżnić jeszcze szereg innych przydatnych węzłów:

- **node-p** - węzły zawierające predykaty, które umożliwiają nietrywialną filtrację faktów,
- **node-r** - węzły redukcji, które przechowując stan wewnętrzny zezwalają na akumulację pewnego wyniku (np. minimalizację pewnej wartości obecnej w faktach).

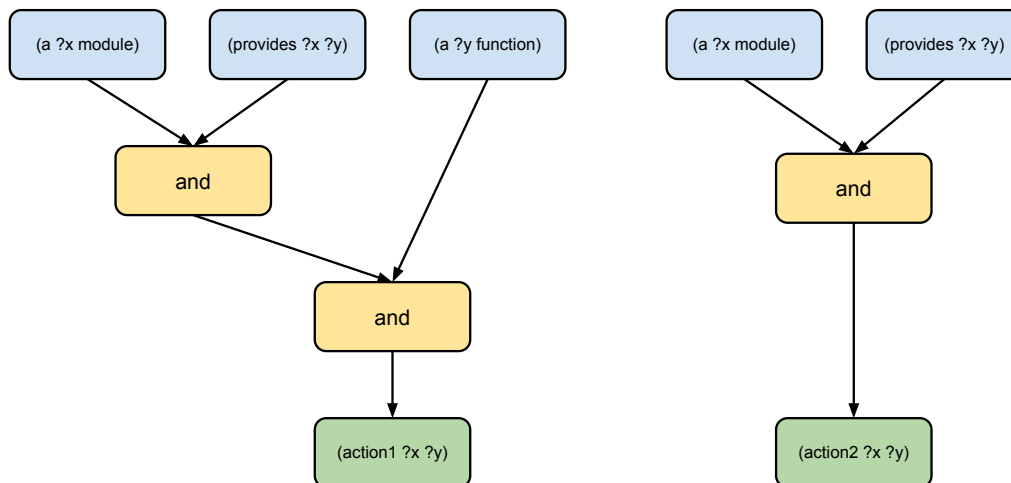
Algorytm transformuje produkcje reguł zamieniając ich lewe strony na kombinacje **node-1** i **node-2**, natomiast prawe strony na węzły kategorii **node-a**. Dla przykładu, poniższe reguły:

```
;; Rule 1
(whenever (and (a ?x module)
               (provides ?x ?y)
               (a ?y function))
  (action1 ?x ?y))

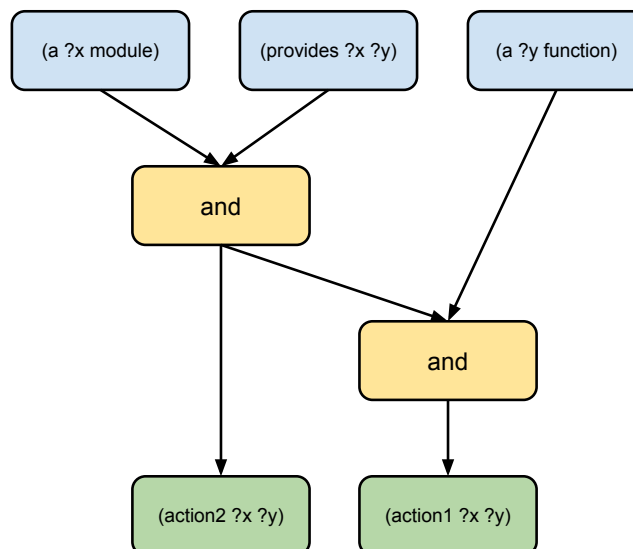
;; Rule 2
(whenever (and (a ?x module)
               (provides ?x ?y))
  (action2 ?x ?y))
```



...zostaną zamienione w wyniku działania algorytmu Rete na dwie rozłączne sieci zaprezentowane poniżej:



...które następnie zostaną zredukowane, w celu usunięcia węzłów redundantnych i optymalizacji ilości wykonywanych operacji, do następującej sieci Rete:



Ponieważ druga część algorytmu polegająca na redukcji sieci jest operacją relatywnie skomplikowaną, zdecydowano się w pierwszej kolejności zaimplementować *naiwną* wersję algorytmu Rete, która nie optymalizuje struktury sieci. Jeśli czas pozwoli, redukcja sieci zostanie dodana w terminie późniejszym.

## 4 Prototyp rozwiązania

Implementacja opisanych w poprzedniej sekcji algorytmów została udostępniona w internecie. Zawiera ona definicje następujących węzłów:

- node-1 - węzły alfa,
- node-2 - węzły beta,
- node-21 - lewostronne adaptory węzłów beta (ułatwiają one obsługę sieci),

- `node-a` - węzły akcji,
- `node-r` - węzły redukcji,
- `node-p` - węzły filtracji.

Implementacja umożliwia wykonywanie następujących operacji:

- `assert!` - asercja faktu do bazy faktów,
- `retract!` - retrakcja faktu z bazy faktów,
- `signal!` - sygnalizacja zdarzenia,
- `whenever` - definicja reguły,
- `remove-rule!` - logiczne usunięcie reguły (fragment sieci Rete odpowiadający lewej stronie reguły pozostaje w sieci nawet po jej usunięciu).

Dodatkowo, implementacja pozwala na parametryzowanie akcji w definicjach reguł, dzięki czemu możliwe jest wykorzystanie dopasowanych wartości w łatwy sposób:

```
(whenever pattern
  variables => actions ...)
```

Obecnie, implementacja nie optymalizuje reprezentacji sieci Rete, jednak w przyszłości będzie możliwe łatwe tego zrealizowanie.

Reguły uruchamiane są sekwencyjnie, co może doprowadzić do zaistnienia nieskończonych pętli w programach z nich korzystających, ponieważ implementacja nie buduje zbioru konfliktowego i agendy uruchamiania produkcji. Rozwiązaniem tego problemu może być dodanie obsługi agendy lub asynchroniczne przetwarzanie asercji i retrakcji faktów. W związku z przeznaczeniem projektu zdecydowano się na drugie rozwiązanie, którego implementacja wymaga integracji projektu z docelowym językiem programowania.

## 4.1 Przykłady zastosowania systemu regułowego

System regułowy powstały w wyniku projektu pozwala między innymi uruchamiać następujące fragmenty kodu:

```
(define new-foo
  (whenever (provides ?m foo)
    () => (display "New foo!\n"))))

(whenever (and (module ?m) (provides ?m gps))
  () => (display "New GPS!\n"))

(whenever (reduce (min ?t 0.1)
  (and (module ?m)
    (provides ?m gps)
    (tolerance ?m gps ?t)))
  (?t) =>
  (display "Better GPS: ")
  (display ?t))
```

```

(display "\n")

(whenever (filter (and (tolerance ?m1 ?gps ?t1)
                      (tolerance ?m2 ?gps ?t2))
                (<= ?t1 ?t2)
                (not-equal? ?m1 ?m2)
                ((lambda (g) (equal? g 'gps)) ?gps))
  (?t1 ?t2) =>
  (display "Better GPS: ")
  (display ?t1)
  (display " vs. ")
  (display ?t2)
  (display "\n"))

(assert! (module A))
(assert! (provides A foo)) ;; New foo!
(assert! (provides A bar))

(assert! (module B))
(assert! (provides B foo)) ;; New foo!
(assert! (provides B gps)) ;; New GPS!

(assert! (provides C gps))
(assert! (module C))      ;; New GPS!

;; Event signaling:
(signal! (provides A gps))
(retract! (module B))
(assert! (module B))

;; Reduction nodes:
(assert! (tolerance C gps 0.01))
(assert! (tolerance B gps 0.001))
(assert! (tolerance A gps 0.0001)) ;; A doesn't provide gps.

;; Rule removal:
(remove-rule! new-foo)

```

## 5 Analiza proponowanego rozwiązania

### 5.1 Analiza wydajności i opłacalności proponowanego rozwiązania

### 5.2 Wnioski

## 6 Bibliografia

- Charles L. Forgy, *Rete: A Fast Algorithm for the Many Pattern / Many Object Pattern Match Problem*, Artificial Intelligence 19 (1982), 17-37, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=115736>

- Anoop Gupta, Charles Forgy, Allen Newell, Robert Wedig, *Parallel Algorithms and Architectures for Rule-Based Systems*, SIGARCH Comput. Archit. News, May 1986, 28-37, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=17360>
- Hesam Samimi, Chris Deaton, Yoshiki Ohshima, Alessandro Warth, and Todd Millstein, *Call by Meaning*, In Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on New Ideas, New Paradigms, and Reflections on Programming & Software (Onward! 2014), ACM, New York, NY, USA, 11-28, <http://doi.acm.org/10.1145/2661136.2661152>
- Rule-based Event Management in the Internet of Things and Services