

Tomasz JANIK, Andrzej W. MITAS

ALGORYTM WYZNACZANIA SKALI CZASU (ZIARNA) W SYSTEMACH PRZYBLIŻONEGO STEROWANIA RUCHEM DROGOWYM

Streszczenie. Proces granulacji czasu w systemach sterowania sygnalizacją świetlną związany jest z podziałem dziedziny czasowej na odpowiednie jednostki, dzięki czemu możliwe staje się skalowanie długości trwania poszczególnych faz sygnalizacyjnych. W ten sposób powstają sposobność i perspektywa zarządzania długością cyklu sygnalizacji świetlnej. Celem niniejszego sprawozdania jest przedstawienie modelu, którego zadanie polega na poszukiwaniu takiego ziarna czasowego, aby sygnalizacja świetlna pracująca na granulach czasowych umożliwiała uzyskanie jak najmniejszych strat czasu.

ALGORITHM OF SETTING THE TIME SCALE (GRANULES) IN ROUGH ROAD TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

Summary. The process of time granulation in traffic lights control systems is related with dividing the time domain into proper units, which permit to size the signal phase interval. Hence that will allow managing the cycle duration of traffic lights at signalized intersection. Introducing such a model that allows finding a proper time granule for traffic lights and letting to get the smallest time losses of vehicles passing the intersection is the objective of the presented report.

1. WPROWADZENIE

Wzrost natężeń ruchu kołowego miejskich sieci drogowych i spadek ich przepustowości wywołane są zwiększającą się mobilnością ludzi oraz liczbą pojazdów. Skrzyżowania poniekąd w naturalny sposób generują zaburzenia w ruchu drogowym. Wobec tego należy poszukiwać nowych rozwiązań, które umożliwią rozładowywanie tworzących się kolejek pojazdów na wlotach skrzyżowań. Docelowo chodzi raczej o zarządzanie grupą skrzyżowań na danym obszarze niż o sterowanie sygnalizacją świetlną pojedynczego skrzyżowania.

Istniejące rozwiązania prowadzą do wielu wymiernych korzyści. Sieci neuronowe stanowią właściwy algorytm minimalizacji czasów i kosztów podróży. Z kolei sterowanie rozmyte jest odpowiednie w przypadku zagadnień, które posiadają wiele i często kolidujących ze sobą danych wejściowych oraz celów do realizacji. Młoda i stale rozwijającą się dziedziną zainteresowań w tej materii jest wnioskowanie oparte na teorii zbiorów przybliżonych.

Obecnie przeprowadza się badania nad implementacją modelu sterowania sygnalizacją świetlną w oparciu o wnioskowanie przybliżone. Straty czasu generowane przez uczestników ruchu powodują, iż generalnie każdy sposób sterowania odbierany jest przez kierowców jako "przybliżony". Wynika to z faktu, iż sterowniki wyznaczają długości czasów otwarcia wlotów na podstawie warunków ruchowych panujących na skrzyżowaniu. Nie uwzględniają natomiast czynników behawioralnych poszczególnych kierowców. Dlatego też sterowanie w oparciu o wnioskowanie przybliżone wydaje się być słusznym podejściem.

2. ZBIORY PRZYBLIŻONE – DEFINICJA OPARTA NA GRANULACJI

Teoria zbiorów przybliżonych stanowi uogólnienie klasycznej teorii zbiorów i zajmuje się ich niepewnością. Pochodzi ona od niemożności kwalifikacji pewnych elementów zbioru, przy czym nie zakłada się, że zbiór jest ściśle określony przez swoje obiekty, ale przyjmuje się możliwość istnienia jego nieostrych granic. Granice zbioru określają przynależność jego elementu do danego zbioru.

Aby opisać zbiór X stanowiący podzbiór przestrzeni U pod względem wartości cech, czy też atrybutów jego podzbioru B (rys.1), definiuje się [1]:

- Aproksymację dolną zbioru X :

$$B_-(X) = \bigcup_{x \in U} \{B(x) : B(x) \in X\}$$

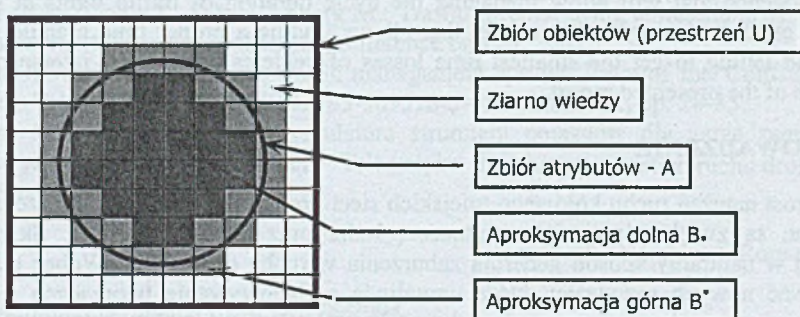
- Aproksymację górną zbioru X :

$$B^+(X) = \bigcup_{x \in U} \{B(x) : B(x) \cap X \neq \emptyset\}$$

- Obszar graniczny zbioru X , który stanowi różnicę pomiędzy aproksymacją górną a dolną:

$$BN_B(X) = B^+(X) - B_-(X)$$

Każdy element zawierający się w dolnej aproksymacji zbioru przybliżonego na pewno do niego należy. Zbiór elementów należących do zbioru przybliżonego lub elementów, co do których nie ma pewności, że do niego należą, nazywa się przybliżeniem górnym. Z kolei każdy obiekt znajdujący się poza aproksymacją górną na pewno do danego zbioru nie należy. Elementy leżące pomiędzy górną a dolną granicą zbioru mogą do niego należeć, ale nie jest to zagwarantowane.



Rys.1. Graficzna reprezentacja zbioru przybliżonego
Fig.1. Graphic representation of rough set

Zbiór B stanowi podzbiór zbioru A , określający relację binarną $I(B)$ na przestrzeni U . Jest to relacja równoważności, nazywana relacją niejasności i zdefiniowana poprzez zależność [1]:

$$(x, y) \in I(B) \Leftrightarrow a(x) = a(y) \quad \forall a \in A$$

Relacja niejasności $I(B)$ opisuje niejako brak wiedzy na temat przestrzeni U , natomiast notacja $a(x)$ wskazuje wartość atrybutu dla elementu x . Jeśli $(x, y) \in I(B)$, to obiekty x oraz y będą nieodróżnialne względem B .

3. GRANULACJA DZIEDZINY CZASOWEJ

Tworzenie odpowiednich systemów logicznych związane jest głównie z koncepcją czasu oraz analizą pojęć lingwistycznych stosowanych w danej logice, a zatem, rozważając istotę czasu, należałoby wprowadzić pojęcie *struktury czasowej punktowej*, wyrażonej jako [4]:

$$\tau = \langle T, < \rangle,$$

gdzie: T – zbiór punktów czasowych,

$<$ – binarna relacja poprzedzania określona na punktach należących do zbioru T .

Struktura czasowa najczęściej kojarzona jest z charakterem ciągłym. A zatem, dla dwóch dowolnych punktów czasowych można zawsze wyznaczyć nowy punkt, który znajduje się pomiędzy nimi. We wszelkich obliczeniach jednakże traktowana jest jako dyskretna i tak też postrzegana jest w systemach sterowania sygnalizacją świetlną (podział na długość trwania cyklu, fazy i sygnału zielonego). Formalnie strukturę tę wyraża definicja [4]:

Strukturę czasową τ nazywamy dyskretną, jeśli dla każdego $t_1, t_2 \in T$ spełnione są następujące warunki:

1. *Jeżeli $t_1 < t_2$, to $\exists t_3 : (t_1 < t_3) \wedge \neg(\exists t_4 : t_1 < t_4 \wedge t_4 < t_3)$;*
2. *Jeżeli $t_2 < t_1$, to $\exists t_3 : (t_3 < t_1) \wedge \neg(\exists t_4 : t_3 < t_4 \wedge t_4 < t_1)$.*

Zdefiniowana struktura czasowa pozwala określić pojęcie granulacji i wyznaczyć ziarna czasu. *Ziarnem* nazywa się podzbiór dziedziny czasowej, a granulację wyraża definicja [4]:

Granulacją nazywamy parę $\langle I, G \rangle$, gdzie I jest zbiorem całkowicie uporządkowanym w znaczeniu relacji $<$, zwanym zbiorem indeksowym, a G jest odwzorowaniem ze zbioru indeksowego do zbioru zawierającego wszystkie podzbiory elementów dziedziny czasowej, przy czym spełnione są warunki:

1. *Jeżeli $i < j$ oraz $G(i)$ i $G(j)$ są niepuste, to każdy element $G(i)$ jest mniejszy od każdego elementu $G(j)$;*
2. *Jeżeli $i < k < j$ oraz $G(i)$ i $G(j)$ są niepuste, wówczas $G(k)$ jest także niepusty.*

Pomiędzy granulacjami zachodzą relacje, które należy właściwie określić. Przykładowo, granulacja tygodniowa jest grubsza od granulacji dziennej, ale drobniejsza od granulacji miesięcznej. Z kolei granulacja dni roboczych nie grupuje się już w żadną inną granulację. Można zatem powiedzieć, że [4]:

- granulacja $\langle I_1, G_1 \rangle$ jest *drobniejsza* od granulacji $\langle I_2, G_2 \rangle$, czyli $G_1 \trianglelefteq G_2$, gdy:

$$\forall i_1 \in I_1 \exists i_2 \in I_2 \rightarrow G_1(i_1) \subseteq G_2(i_2);$$

- granulacja $\langle I_2, G_2 \rangle$ jest *grubsza* od granulacji $\langle I_1, G_1 \rangle$, czyli $G_2 \trianglerighteq G_1$, gdy:

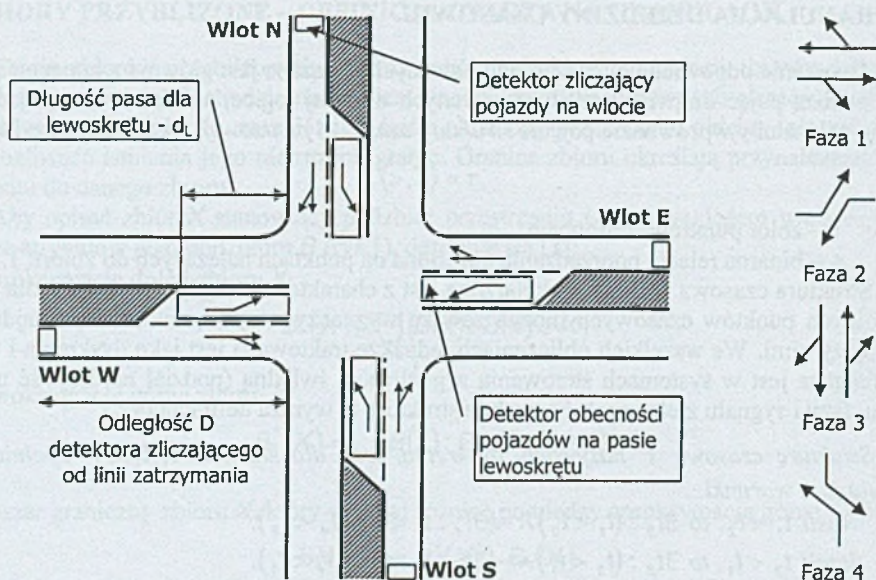
$$\forall i_2 \in I_2 \exists i_1 \in I_1 \rightarrow G_2(i_2) \supseteq G_1(i_1);$$

- granulacja $\langle I_1, G_1 \rangle$ *grupuje się* w granulację $\langle I_2, G_2 \rangle$, gdy zachodzi zależność:

$$\forall i_2 \in I_2 \exists J \in I_1 \rightarrow G_2(i_2) = \bigcup_{i_1 \in J} G_1(i_1).$$

4. KONCEPCJA MODELU

W proponowanym modelu sterownie ruchem odbywa się za pomocą reguł przybliżonych w celu obsługi kolejnych faz sygnalizacji świetlnej skrzyżowania czterowłotowego (rys.2).



Rys.2. Schemat modelowanego skrzyżowania oraz fazy sygnalizacji świetlnej
Fig.2. Scheme of modeled intersection and traffic lights phases

4.1. ZAŁOŻENIA FORMALNE MODELU

- skrzyżowanie jest w pełni akomodacyjne;
- odległość detektora obecności od linii warunkowego zatrzymania $D = 150 \text{ m}$;
- na wydzielonych pasach lewoskrętów znajdują się detektory zajętości;
- fazy lewoskrętów są aktywowane tylko wtedy, gdy detektory zajętości wskazują obecność pojazdów na odpowiednim pasie ruchu;
- długość obliczeniowa pojazdu $l_p = 7,5 \text{ m}$ (na podstawie modelu ruchu Na-Sch [3, 6]);
- wartość natężenia maksymalnego (F_{max}) oraz maksymalnej kolejki pojazdów (Q_{max}) dla poszczególnych faz jest wyznaczana z następujących zależności [3, 5]:

$$\begin{aligned} F_{max}^{NS} &= \max(F_N, F_S); & F_{max}^{WE} &= \max(F_W, F_E); \\ Q_{max}^{NS} &= \max(Q_N, Q_S); & Q_{max}^{WE} &= \max(Q_W, Q_E); \end{aligned}$$

- jeżeli na dwóch dowolnych wlotach potoków kolizyjnych detektory obecności znajdują się nieustannie w stanie wzbudzenia (długość kolejki pojazdów na wlocie $\geq D$), to sygnalizacja przechodzi w stan pracy stałoczasowej;
- ponowne przejście do pracy akomodacyjnej następuje, gdy kolejka maksymalna jest mniejsza od maksymalnej kolejki rejestrowanej przez system:

$$Q_{max}^{NS} \leq \frac{D}{l_p} \text{ lub } Q_{max}^{WE} \leq \frac{D}{l_p},$$

- maksymalna prędkość na wlocie: $v_{max} = 50 [\text{km/h}] \approx 13,9 [\text{m/s}] \approx 2 [\text{kom./s}]$;
- minimalna długość sygnału zielonego (zgodnie z [2]): $T_{GRmin} = 5 [\text{s}]$;
- maksymalna długość sygnału zielonego dla lewoskrętów: $T_{GR(L)max} = 12 [\text{s}]$;
- maksymalna długość sygnału zielonego dla pozostałych relacji: $T_{GRmax} \leq 35,7 [\text{s}]$.

4.2. OPIS PRACY STEROWNIKA

Proponowany sterownik pracuje w dwóch etapach. W pierwszym kroku szacowane są relatywne natężenia ruchu na wlotach równoległych za pomocą pojazdów zbliżających się do skrzyżowania. Podczas fazy na wprost i prawoskrętu zostaje podjęta decyzja o zakończeniu lub wydłużeniu bieżącej fazy światła zielonego. Sterownik jest aktywowany po czasie T_{GRmin} od rozpoczęcia się sygnału zielonego, a długość fazy nie może przekroczyć wartości maksymalnej czasu trwania sygnału zielonego T_{GRmax} . Dane wejściowe dla sterownika stanowią długości strumieni F oraz kolejek Q pojazdów na czterech wlotach.

Intensywność ruchu jest funkcją maksymalnego strumienia obserwowanego w interwale Δt oraz zależy od maksymalnej długości kolejki. Zależność T_{GR} od intensywności ruchu dla długości trwania sygnału zielonego przedstawia się za pomocą tabeli decyzyjnej (tab.1). Intensywność ruchu dla fazy sygnału czerwonego jako długość kolejki wyznacza się według następujących zależności [3, 5]:

- $T_{RED} = \max(Q_N, Q_S)$ dla ruchu w kierunku N-S,
- $T_{RED} = \max(Q_W, Q_E)$ dla ruchu w kierunku W-E.

W drugim kroku sterownik określa ewentualne wydłużenie lub skrócenie bieżącej fazy sygnału zielonego. Na podstawie tabeli decyzyjnej o długości trwania sygnału zielonego T_{GR} oraz wyznaczonej intensywności ruchu sterownik podejmuje decyzję odnośnie do przerywania (P) lub wydłużenia (W) aktualnego sygnału zielonego T_{GR} , (tab.2).

Tabela 1

Tabela decyzyjna zależności długości światła zielonego T_{GR} od intensywności

T_{GR}		Maksymalny potok F_{max}			
		Z (zero)	S (mały)	M (średni)	B (duży)
Kolejka maksymalna Q_{max}	Z (zero)	Z	S	M	B
	S (mały)	S	M	B	B
	M (średni)	M	B	B	B
	B (duży)	B	B	B	B

Tabela 2

Tabela decyzyjna dla zmian sygnałów świetlnych

(W)ydłużenie lub (P)rzerywanie sygnału		Długość światła zielonego T_{GR}			
		Z (zero)	S (mała)	M (średnia)	B (duża)
Intensywność ruchu T_{RED}	Z (zero)	P	W	W	W
	S (mała)	P	W	W	W
	M (średnia)	P	P	W	W
	B (duża)	P	P	W	W

W przypadku gdy sterownik zakończy wyświetlanie sygnału zielonego dla kierunku "na wprost i w prawo", to faza lewoskrętu zostanie zainicjowana wtedy, gdy na pasie lewoskrętu zostanie wykryta obecność pojazdu. W przypadku inicjacji tej fazy będzie ona miała długość równą przynajmniej długości trwania cyklu minimalnego dla fazy lewoskrętu. Zostanie zakończona, jeżeli żaden kolejny pojazd nie będzie wykryty lub długość cyklu osiągnie wartość maksymalną. Po zakończeniu tej fazy sterownik ponownie sprawdza, która z faz "na wprost i w prawo" wymaga obsługi.

W przypadku stwierdzenia większych intensywności ruchu na kierunkach kolizyjnych niż możliwości pomiarowe zainstalowanych detektorów, a więc detektory zliczające znajdują się stale w stanie wzbudzenia, sterownik przechodzi do trybu pracy stałoczasowej. Taki stan trwa do momentu, aż intensywność ruchu na wlotach obsługiwanych przez jedną z grup sygnałowych spadnie do poziomu mierzalności. Wobec tego tryb pracy stałoczasowej kończy się w momencie, gdy pojazdy przejeżdżają nad detektorem, a nie stoją bezustannie nad nim w długiej kolejce.

Opis działania sterownika przedstawiono w postaci schematu blokowego (rys.3).

4.3. OPIS MODELU RUCHU POJAZDÓW

Jako aparat odpowiedzialny za przemieszczanie pojazdów wybrano model ruchu oparty na automacie komórkowym Nagela-Schreckenberga. Każda komórka w danym takcie może być pusta lub zajęta tylko przez jeden pojazd i jednocześnie jeden pojazd może zajmować w danym kroku czasowym tylko jedną komórkę. Wszystkie komórki uaktualniane są w sposób synchroniczny, a reguły zmiany stanu opisują dokładnie, w jaki sposób w kolejnym kroku czasowym dana komórka powinna zmienić swój stan. Zależy to od bieżącego stanu danej komórki oraz bieżących stanów dwóch najbliższych sąsiadów danej komórki [3, 6].

Każdy pojazd w jednym takcie porusza się do przodu o jedną komórkę pod warunkiem, że ta jest pusta. Jeżeli komórka znajdująca się bezpośrednio przed danym pojazdem jest już zajęta, to nie nastąpi przemieszczenie pojazdu nawet, gdy pojazd blokujący przemieści się w tym samym kroku czasowym. Odległość pomiędzy dwoma sąsiadującymi pojazdami stanowi lukę i jest to liczba pustych komórek między dwiema komórkami zajętymi.

Dynamikę systemu przedstawia się za pomocą reguł jednoczesnego uaktualnienia [3, 6]:

- Przyspieszanie – jeżeli prędkość pojazdu jest mniejsza od prędkości maksymalnej v_{max} , to jego prędkość wzrasta o jeden, ale pozostaje bez zmian dla $v_n = v_{max}$:

$$v_n \rightarrow \min(v_n + 1; v_{max});$$

- Hamowanie – jeżeli luka pomiędzy danym pojazdem a pojazdem znajdującym się bezpośrednio przed nim jest mniejsza od prędkości danego pojazdu v_n , to jego prędkość jest redukowana do wartości luki pomniejszonej o jeden ($d_n - 1$):

$$v_n \rightarrow \min(v_n; d_n - 1);$$

- Randomizacja – jeżeli prędkość pojazdu jest większa od 0, to jego prędkość maleje losowo o jeden z prawdopodobieństwem $p(v)$, ale pozostaje bez zmian dla $v_n = 0$:

$$v_n \rightarrow \max(v_n - 1; 0);$$

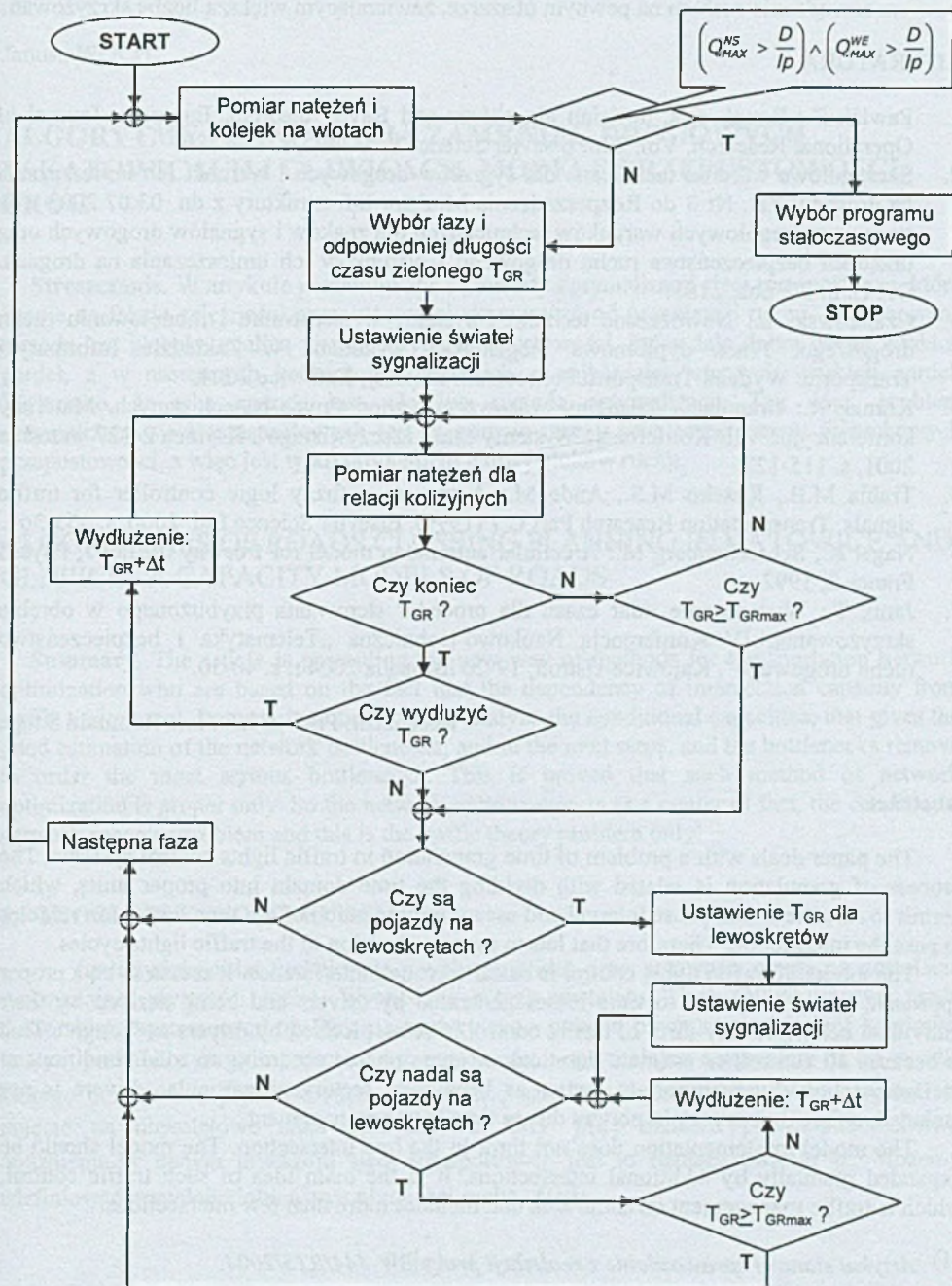
- Przemieszczenie – każdy pojazd porusza się w zależności od swojej nowej prędkości, określonej w poprzednich krokach:

$$x_n \rightarrow x_n + v_n \Delta t \text{ gdzie } \Delta t = 1[s].$$

5. PODSUMOWANIE

Zadaniem przedstawionego modelu jest wyznaczanie takich miar czasu, które zapewnią minimalizację strat czasu przejazdu pojazdów przez skrzyżowanie. Model sterowania opiera się na regułach przybliżonych. Wydaje się to być słusznym podejściem szczególnie ze względu na straty czasu generowane przez uczestników ruchu, a będące wynikiem czynników behawioralnych poszczególnych kierowców. Każda forma sterowania sygnalizacją świetlną jest odbierana przez uczestników ruchu jako "przybliżona". Wiąże się to z tym, iż sterowniki

wyznaczają długości faz sygnałów zielonych na podstawie warunków ruchowych i nie uwzględniają czynników biometrycznych poszczególnych kierowców.



Rys.3. Algorytm pracy sterownika sygnalizacji

Fig.3. Algorithm of traffic light control

Implementacja modelu nie ogranicza się do pojedynczego skrzyżowania. Stopniowo należałoby rozbudować model o kolejne skrzyżowania. Główną ideą takiego sterowania jest bowiem zarządzanie ruchem na pewnym obszarze, zawierającym większą liczbę skrzyżowań.

LITERATURA

1. Pawlak Z.: Rough sets, decision algorithms and Bayes' theorem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 136. Elsevier Science Ltd. 2002, s. 181-189.
2. Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczania na drogach. Zał. Nr 3 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dn. 03.07.2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach. Dz. U. nr 20, poz. 2181.
3. Czapkowski L.: Nowoczesne techniki i systemy w sterowaniu i modelowaniu ruchu drogowego. Praca dyplomowa magisterska wykonana w Zakładzie Informatyki Transportu. Wydział Transportu Politechniki Śląskiej, Katowice 2004.
4. Klimek R.: Granulacja dziedziny czasowej w temporalnych bazach danych. Materiały konferencyjne VIII Konferencji "Systemy czasu rzeczywistego", Krynica 24-27 września 2001, s. 115-123.
5. Trabia M.B., Kaseko M.S., Ande M.: A two-stage fuzzy logic controller for traffic signals. *Transportation Research Part C* 7 (1999), Elsevier Science Ltd. 2000, s. 353-367.
6. Nagel K., Schreckenberg M.: A cellular automaton model for freeway traffic. *J. Phys. I France* 2, 1992.
7. Janik T.: Wyznaczanie miar czasu dla procedur sterowania przybliżonego w obrębie skrzyżowania. IV Konferencja Naukowo-techniczna „Telematyka i bezpieczeństwo ruchu drogowego”. Katowice-Ustroń, 19-20 listopada 2004 r. s. 40-50.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Romuald Szopa

Abstract

The paper deals with a problem of time granulation in traffic lights control systems. The process of granulation is related with dividing the time domain into proper units, which permit to size the signal phase interval and assure minimization of the time losses for vehicles to pass the intersection. Therefore that lets to manage duration of the traffic lights cycles.

The model of traffic lights control is based on rough interference. It seems to be a proper approach, particularly due to time losses generated by drivers and being derived by their individual behavior. Any form of traffic control is being pictured by drivers as "rough". That is because all controllers estimate durations of green phases according to road conditions at the intersection. Such important matter as behavioral factors of particular drivers is not included, although it is very important due to time losses management.

The model implementation does not limit to the one intersection. The model should be expanded gradually by additional intersections. It is the main idea of such traffic control, which is traffic management on some area that includes more than few intersections.

Artykuł stanowi sprawozdanie z realizacji pracy BW-444/RT5/2004.