

Poniżej przedstawiono zagadnienie automatycznej pracy suwnicy (Sawodny *et al.* 2002), będącej elementem np. zautomatyzowanej linii produkcyjnej. Opracowany system sterowania realizuje „bezpieczny” transport ładunku (Benhidjeb, Gissinger 1995), a więc uwzględnia tłumienie jego oscylacji oraz omijanie statycznych przeszkód, występujących w przestrzeni roboczej (Żabiński 2003). Przemysłowe rozwiązania problemu tłumienia wahań transportowanego przez suwnicę ładunku dotyczą głównie systemów, w których urządzenie jest sterowane bezpośrednio przez człowieka. Opierają się one na odpowiedniej korekcie (realizowanej *on-line*) rozkazów wydawanych przez operatora, np. system antywahaniowy ASLC (Hetric 2001). W koncepcji omawianej w niniejszym rozdziale, zadana trajektoria jest realizowana bez udziału operatora. Taki tryb pracy suwnicy, w kontekście wzrastającego stopnia automatyzacji procesów wytwarzania, nabiera coraz większego znaczenia praktycznego (Sawodny *et al.* 2002).

Zagadnienie sterowania suwnicą posiada bogatą literaturę. Szeroki przegląd dotychczas stosowanych metod przedstawiono w publikacji Sawodnyego *et al.* (2002). Znane są rozwiązania zadań odpornego i optymalnoczasowego sterowania układami tego typu. Wykorzystują one nieliniowe (rozdział 2.4) oraz zlinearyzowane modele dynamiki suwnicy (Benhidjeb, Gissinger 1995, Pauluk 2001). W przypadku układów rzeczywistych, złożoność problemu znacznie wzrasta, gdy występuje konieczność kompensacji sił tarcia oraz uwzględnienia ograniczeń członów wykonawczych (Hanafy 2003).

Klasyczne algorytmy sterowania suwnicą (Fang *et al.* 2001, Pauluk 2001) wymagają analizy skomplikowanych i silnie nieliniowych równań dynamiki. Odmiennym podejściem, wykorzystanym w niniejszej pracy, jest użycie regulatorów rozmytych z regułami sterowania, uzyskanymi na bazie doświadczeń operatora. Pozwala to, w względnie prosty sposób, uzyskać zadowalające rezultaty (Benhidjeb, Gissinger 1995, Pauluk 2001, Hanafy 2003, Żabiński 2003).

Zadanie sterowania

Należy przenieść ładunek pomiędzy dwoma punktami przestrzeni roboczej, omijając nieruchome przeszkody o znanym kształcie i rozmiarach oraz tłumiąc drgania przenoszonej masy. Dodatkowy warunek zakłada uzyskanie możliwie krótkiego czasu realizacji zadania i możliwie małego wydatku energetycznego na sterowanie.

Warunki realizacji zadania

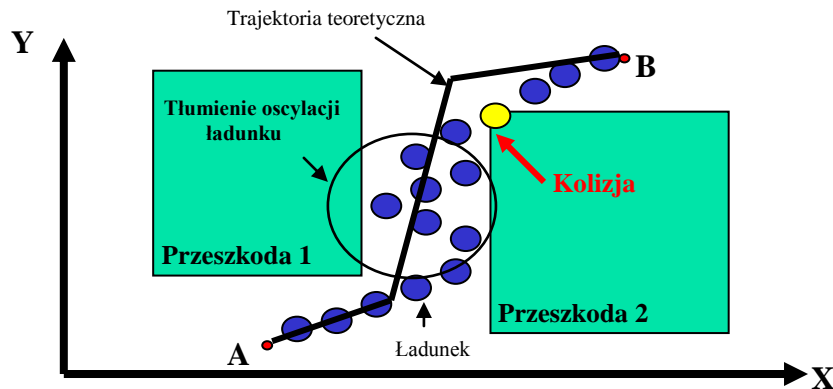
Analiza zagadnienia prowadzi do wyodrębnienia dwóch podstawowych składników systemu sterowania: modułu śledzenia zadanej trajektorii oraz układu tłumienia oscylacji ładunku (Żabiński 2003). Ponieważ tłumienie odbywa się poprzez odpowiednie ruchy wózka i mostu (nie korzystano tu z opuszczania i podnoszenia ładunku), składniki te generują w kolejnych chwilach czasu, zgodne lub sprzeczne ze sobą sterowania. Taka metoda tłumienia drgań wydłuża czas wykonania zadania i zwiększa wydatek energetyczny na sterowanie. Na podstawie wiedzy operatorskiej (Żabiński 2003) sformułowano następujący warunek realizacji zadania:

*Tłumieniu powinny podlegać tylko **niebezpieczne drgania** transportowanej masy, a więc takie, które mogą doprowadzić do jej zerwania, uszkodzenia elementów suwnicy bądź kolizji ładunku z przeszkodą.*

Na podstawie doświadczeń uzyskanych przy pomocy systemu z regulatorami PID (Żabiński 2003) sformułowano, podane poniżej, trzy progowe warunki realizacji zadania.

1) *Generator trajektorii kontroluje rzeczywiste położenie układu i zawiera mechanizm czasowego zatrzymania i wznowienia realizacji trajektorii.*

Podczas intensywnej akcji tłumiącej, rzeczywiste położenie ładunku może znacznie odbiegać od trajektorii teoretycznej, powodując w pewnych przypadkach kolizje z przeszkodami.



Rys. 9.1. Przykład kolizji ładunku z przeszkodą jako wynik silnej akcji tłumiącej

Na rys. 9.1 przedstawiono sytuację, w której transportowana masa (na skutek silnej akcji tłumiącej) znajduje się pomiędzy przeszkodami, mimo iż generator trajektorii osiągnął docelowy punkt B. Po wytłumieniu oscylacji ładunku, system powraca do zadania śledzenia, dążąc do punktu B najkrótszą drogą, co spowoduje kolizję z Przeszkodą 2. Generator trajektorii spełniający podany powyżej warunek 1, wstrzyma swoje działanie, gdy opóźnienie układu rzeczywistego względem zadanej trajektorii przekroczy założoną wartość. Dzięki temu, ładunek będzie poruszał się do punktu B wzdłuż zaprojektowanej trajektorii zadanej, omijając Przeszkodę 2.

- 2) Sterowanie jest odpowiednią kombinacją sygnałów generowanych przez moduł śledzenia trajektorii oraz układ tłumienia oscylacji ładunku. Aby zapobiec przesunięciu wózka nad przeszkodę (w wyniku tłumienia), sterowanie zawsze zawiera pewien procent sygnału śledzenia.

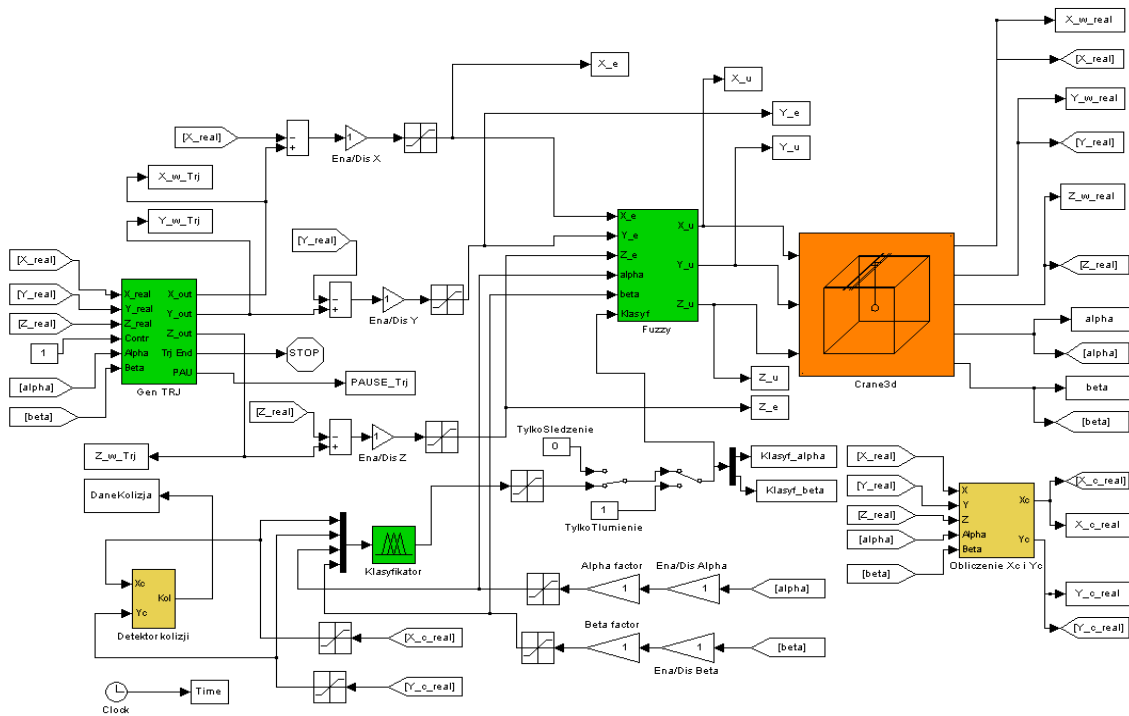
Podstawową funkcją modułu śledzenia jest utrzymanie ładunku w pewnym „bezpiecznym” otoczeniu zadanej trajektorii, nie zaś jej precyzyjne odtworzenie.

- 3) W systemie należy zastosować tzw. klasyfikator przestrzeni, określający czy dla danego położenia ładunku i znanych wartości kątów jego wychylenia, należy tłumić oscylacje i w jakim stopniu.

Pozwoli to uzyskać możliwie krótki czas realizacji zadania i możliwie mały wydatek energetyczny na sterowanie.

Układ sterowania z regulatorami rozmytymi

Układ sterowania (rys. 9.2) tworzą trzy główne elementy: regulator rozmyty (blok **Fuzzy**), generator trajektorii (**Gen TRJ**) oraz klasyfikator przestrzeni (**Klasyfikator**). System uzupełniono o blok (**Obliczenie X_c i Y_c**), wyznaczający rzeczywiste położenie ładunku na podstawie wzoru (9.1). Dodatkowym elementem układu jest moduł detektora kolizji (**Detektor kolizji**), który dla znanego położenia i rozmiarów przeszkód informuje o zderzeniu ładunku z przeszkodą.



Rys. 9.2. Układ sterowania suwnicą SUW - system szybkiego prototypowania MATLAB/Simulink/RT-CON

Położenie ładunku x_c, y_c w kartezjańskim układzie odniesienia dane jest zależnościami

$$\begin{cases} x_c = x_w + R \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ y_c = y_w + R \sin(\beta) \end{cases} \quad -\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}, \quad -\frac{\pi}{2} < \beta < \frac{\pi}{2}, \quad (9.1)$$

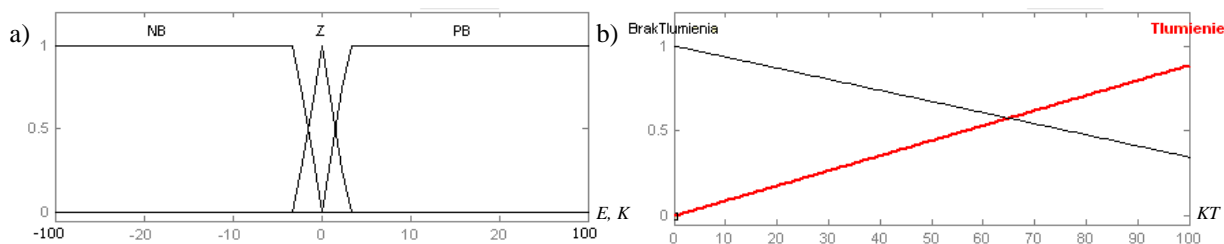
gdzie x_w i y_w opisują położenie wózka, R określa długość linki (przy założeniu stałego jej naprężenia), zaś α i β^* to kąty wychylenia transportowanej masy.

System sterowania, przedstawiony na rys. 9.2, działa w pakiecie MATLAB/ Simulink/RT-CON i umożliwia sterowanie w czasie rzeczywistym laboratoryjnym modelem trójwymiarowej suwnicy SUW.

Regulator rozmyty

Do sterowania wózkiem (ruch w osi x) oraz mostem (ruch w osi y) zastosowano dwa niezależne trójwejściowe regulatory rozmyte typu Takagi-Sugeno (t-norma to iloczyn, wyjście opisuje zależność 6.2). Sygnały wejściowe tych układów to błąd (E) położenia wózka/mostu w stosunku do zadanej trajektorii (dla wózka w osi x , dla mostu w osi y), wartość odpowiedniego kąta (K) wychylenia ładunku (α dla wózka i β dla mostu) oraz stopień tłumienia (KT) uzyskiwany z klasyfikatora przestrzeni. Zbiory rozmyte określone dla wejść, przedstawiono na rys. 9.3. Sygnałem wyjściowym regulatorów jest sterowanie (U) wózka/mostu, które w następnikach reguł przyjmuje wartości: N (-1), Z (0), P (1). Każdy z układów rozmytych posiada 6 reguł, przedstawionych poniżej, z których 3 pierwsze są odpowiedzialne za śledzenie trajektorii a 3 ostatnie za tłumienie odpowiedniego kąta wychylenia (α dla wózka, β dla mostu). W osi Z (podnoszenie – opuszczanie ładunku) zastosowano regulator PID (Żabiński 2003).

* Tutaj α i β są bezpośrednio mierzone w systemie i różnią się od kątów wykorzystywanych w modelu matematycznym, opisanym w rozdziale 2.4.



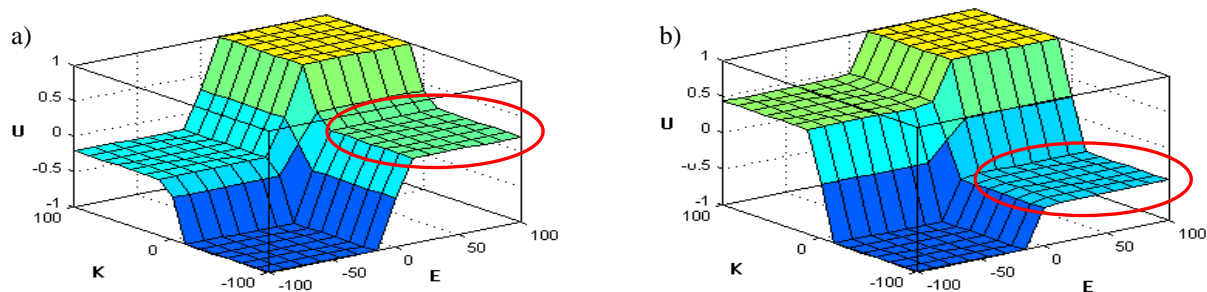
Rys. 9.3. Zbiory wejściowe dla regulatorów wózka i mostu (przestrzeń znormalizowana): E i K (a), KT (b)

Zbiór reguł:

1. Jeżeli E jest NB i KT jest BrakTłumienia, to $U = N$;
2. Jeżeli E jest Z, to $U = Z$;
3. Jeżeli E jest PB i KT jest BrakTłumienia, to $U = P$;
4. Jeżeli K jest NB i KT jest Tłumienie, to $U = N$;
5. Jeżeli K jest Z, to $U = Z$;
6. Jeżeli K jest PB i KT jest Tłumienie, to $U = P$.

Tak skonstruowane regulatory posiadają zmienną powierzchnię sterowania $U(E,K)$ (rys. 9.4), która jest kombinacją sygnałów śledzenia i tłumienia w funkcji stopnia tłumienia KT , określanego przez klasyfikator przestrzeni. Przedstawiona na rys. 9.3b prosta BrakTłumienia jest zmodyfikowaną negacją zbioru Tłumienie. Przyjmuje ona wartości większe od zera w całej przestrzeni wejściowej. Dzięki temu, gdy występuje błąd śledzenia, udział reguł od 1 do 3 (odpowiedzialnych za śledzenie trajektorii) w wynikowym sygnale sterującym jest niezerowy. Gdyby BrakTłumienia był bezpośrednią negacją Tłumienia, to w analogicznym przypadku sygnał sterowania byłby generowany w całości przez reguły od 4 do 6 (odpowiedzialne za tłumienie odpowiedniego kąta wychYLENIA ładunku). Działałby wtedy jedynie układ tłumienia oscylacji, co nie jest zgodne z warunkami realizacji zadania.

Regulatory rozmyte dla wózka i mostu generują sprzeczne sterowania dla reguł 1 i 6 oraz 3 i 4. Dla przykładu, gdy błąd E śledzenia trajektorii jest PB (rys. 9.3a), to sygnał sterowania powinien być duży dodatni, aby wózek i most nadążył za trajektorią (reguła 3). Gdy kąt K jest NB, to sygnał sterowania powinien być duży ujemny, gdyż ładunek jest znacznie opóźniony w stosunku do wózka/mostu, a więc silnie wychylony i dlatego należy tłumić jego oscylacje (reguła 4). W takim przypadku regulator rozmyty generuje sygnał sterujący o wartości dodatniej albo ujemnej (rys. 9.4 a i b - obszary zaznaczone owalami). Zależy to od stopnia tłumienia (KT) określonego dla danego kąta w obszarze, w którym aktualnie znajduje się ładunek. Na przykład dla $KT=50\%$ (rys. 9.4a) przeważa akcja śledzenia i sygnał sterujący jest dodatni, zaś dla $KT=100\%$ (rys. 9.4b) dominuje tłumienie oscylacji ładunku i sterowanie jest ujemne. Projektant ma możliwość określania tych zależności modyfikując kształt zbiorów przedstawionych na rys. 9.3b.



Rys. 9.4. Powierzchnia sterowania regulatora wózka/mostu dla: $KT = 50\%$ (a), $KT = 100\%$ (b)

Należy podkreślić fakt, iż powierzchnie sterowania regulatorów wózka i mostu są modyfikowane *on-line* podczas działania układu w czasie rzeczywistym. Ich kształt w danym kroku sterowania zależy głównie od obszarów tłumienia zdefiniowanych w klasyfikatorze przestrzeni dla aktualnego położenia i kątów wychYLENIA ładunku.

Generator trajektorii

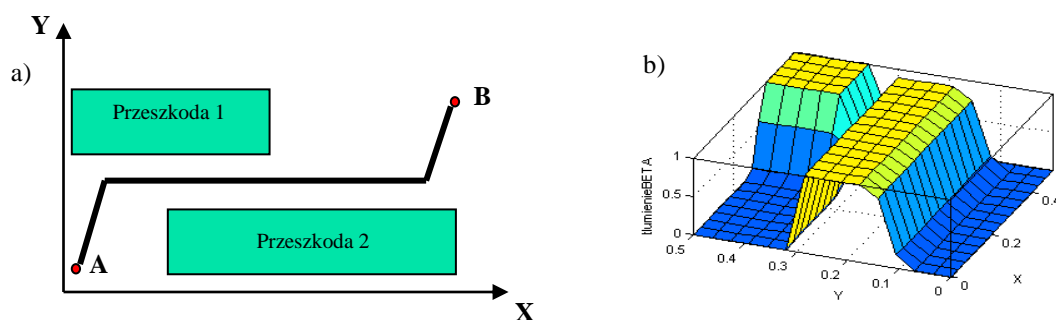
Generator trajektorii umożliwia zaprojektowanie dwuwymiarowej ścieżki ruchu jako łamanej o 3 lub 6 elementach. Podstawową jego cechą jest możliwość automatycznego wstrzymania wyznaczania kolejnych punktów trajektorii, gdy nastąpi przekroczenie założonego błędu śledzenia dla wózka lub mostu. Gdy wartość błędu spadnie poniżej przyjętego progu, następuje automatyczne wznowienie działania generatora. Dodatkowe cechy układu to możliwość określenia prędkości realizacji ruchu oraz automatycznej pracy w cyklu: dojazd do pozycji startowej, pobranie ładunku, realizacja trajektorii, pozostawienie ładunku, powrót do pozycji startowej. Moduł został stworzony jako S-funkcja w języku C.

Klasyfikator przestrzeni

Klasyfikator przestrzeni na podstawie położenia ładunku oraz jego wychylenia określa stopień tłumienia poszczególnych kątów. Jest on zrealizowany jako element rozmyty Takagi-Sugeno (t-norma to minimum, wyjście to suma) i pozwala na względnie proste tworzenie obszarów tłumienia (np. rys. 9.5, rys. 9.6). Są one definiowane w pobliżu przeszkód na podstawie reguł postaci:

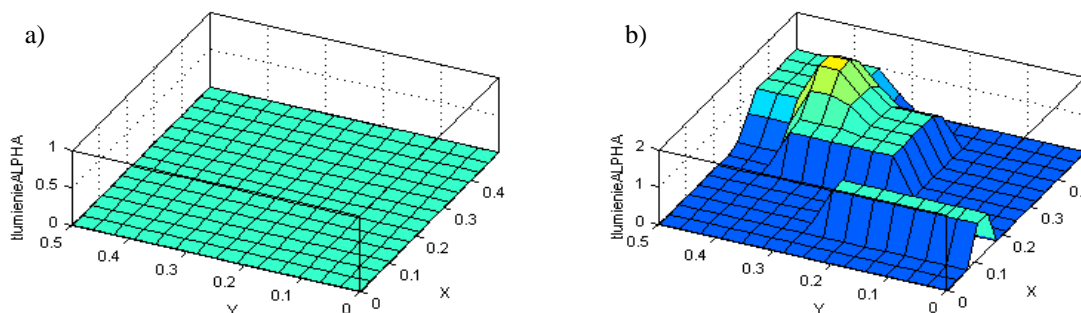
Jeżeli X jest ObszarTłumieniaKąta α i Y jest ObszarTłumieniaKąta α i α jest PB, to Tłumienie α jest Duże.

Zaproponowana postać klasyfikatora pozwala w łatwy sposób wprowadzać kolejne obszary, których wpływ na wynikowy stopień tłumienia będzie sumowany. Warunek tłumienia oscylacji niezależny od położenia ładunku dotyczy wychyleń przekraczających wartości bezpieczne dla elementów konstrukcyjnych suwnicy (tutaj powyżej 5°).



Rys. 9.5. Układ przeszkód (a), przykładowe obszary tłumienia kąta β dla $\beta = 5^\circ$ (b)

W regułach klasyfikatora występują aktualne wartości kątów wychylenia ładunku, dlatego uzyskiwane powierzchnie tłumienia nie są statyczne. Dzięki temu stopień tłumienia zależy nie tylko od położenia ładunku w przestrzeni, ale również od aktualnej wartości jego kątów wychylenia. Na rys. 9.6 przedstawiono powierzchnie tłumienia dla $\alpha = 0^\circ$ oraz $\alpha = 5^\circ$. Gdy kąt α jest zerowy, klasyfikator generuje zerowy stopień tłumienia tego kąta dla dowolnego położenia ładunku w przestrzeni (rys. 9.6a).

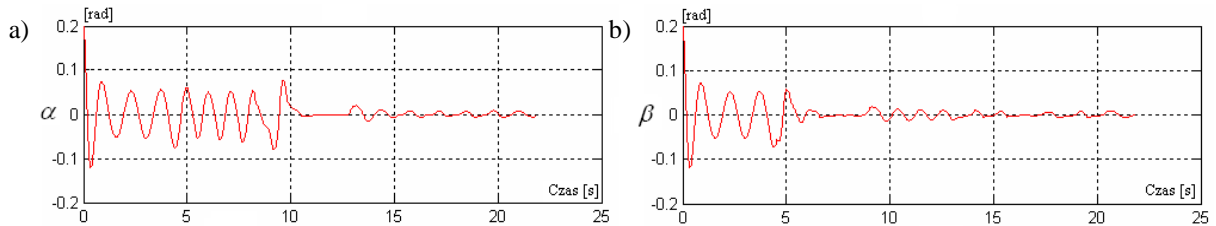


Rys. 9.6. Obszary tłumienia kąta α dla układu z dwiema przeszkodami z rys. 9.5: $\alpha = 0^\circ$ (a), $\alpha = 5^\circ$ (b)

Stosowanie trapezoidalnych zbiorów dla wejść położenia, pozwala w łatwy sposób tworzyć powierzchnie tłumienia o kształcie ostrosłupów ściętych. Dzięki temu, stopień tłumienia w naturalny sposób narasta wraz ze zbliżaniem się ładunku do obszaru tłumienia.

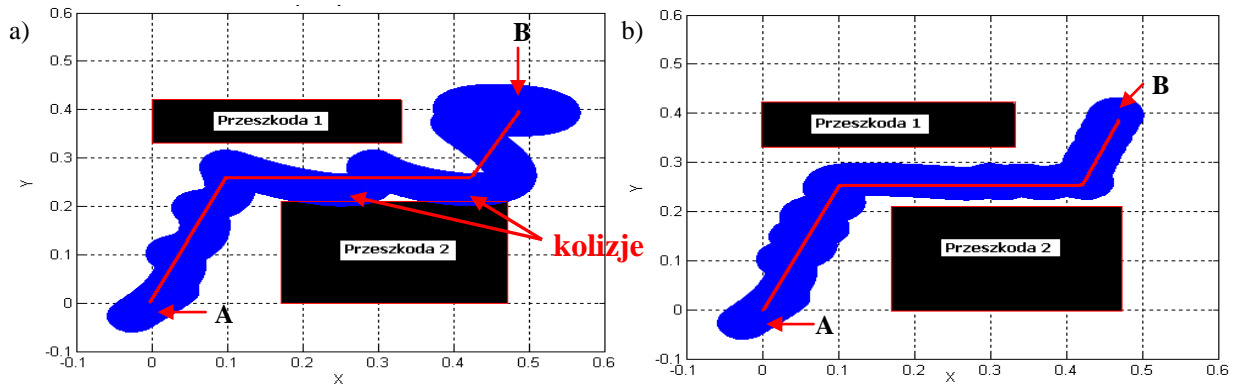
Wyniki eksperymentów

System przetestowano podczas badań symulacyjnych oraz eksperymentów rzeczywistych realizowanych za pomocą obiektu SUW. Poniżej zamieszczono wyniki wybranego zadania sterowania z dwiema przeszkodami w przestrzeni roboczej. Na rys. 9.8 przedstawiono realizację ruchu przy początkowych wartościach kątów wynoszących około 12° (rys. 9.7).



Rys. 9.7. Kąty wychyleń ładunku podczas realizacji trajektorii z rys. 9.8 przez układ z klasyfikatorem

Po uruchomieniu systemu sterowania amplituda oscylacji ładunku została zredukowana do poziomu około 5° (rys. 9.7), który jest przyjęty jako bezpieczny dla SUW. Po 5 sekundzie ruchu, kąt β został stłumiony (rys. 9.7b) ze względu na zbliżanie się trajektorii do Przeszkody 1 (obszar tłumienia na rys. 9.5b). Po 10 sekundzie, również kąt α został stłumiony (rys. 9.7a) ze względu na bliskość Przeszkody 2 (obszar tłumienia na rys. 9.6b). Jak pokazano na rys. 9.7, w dalszej części trajektorii oscylacje ładunku były niewielkie.



Rys. 9.8. Realizacja przykładowego zadania bez klasyfikatora (a) i z klasyfikatorem (b)

Na rys. 9.8a oraz rys. 9.8b zamieszczono wynik realizacji identycznego zadania dla układu bez oraz z klasyfikatorem. W drugim przypadku wyeliminowano kolizje z przeszkodami przy jednoczesnym wydłużeniu czasu realizacji zadania jedynie o 12%. W końcowej fazie ruchu (przed opuszczeniem ładunku) oscylacje w układzie z klasyfikatorem zostały całkowicie wyeliminowane dzięki zdefiniowanym w pobliżu punktu B obszarom tłumienia (rys. 9.5b, rys. 9.6b). Bez klasyfikatora, ładunek oscylował w punkcie docelowym ze znaczną amplitudą, co uniemożliwiało jego bezpieczne pozostawienie (rys. 9.8a).

Rys. 9.8 odwzorowuje zależności geometryczne pomiędzy rozmiarami przeszkód i ładunku oraz ich położeniem w przestrzeni (ładunek ma kształt ściętego stożka).

Doświadczenia przeprowadzone podczas sterowania w czasie rzeczywistym obiektem SUW pokazują, że logika rozmyta pozwala w stosunkowo łatwy i szybki sposób zbudować regulator dla złożonego zadania sterowania. Podejście takie znacznie różni się od metod

klasycznych, przy pomocy których opracowanie podobnego systemu wymagałoby czasochłonnych analiz skomplikowanych równań dynamiki. Z kolei stworzenie optymalnych reguł sterowania bez analizy matematycznego modelu obiektu nie jest możliwe.