

Karol KOŃCZALSKI, Piotr KROGUL, Mirosław PRZYBYSZ, Rafał TYPIAK

OCENA WYMAGAŃ DLA HYDROSTATYCZNEGO UKŁADU SKRĘTU PLATFORMY TRANSPORTOWEJ

W artykule omówione zostały wymagania dla hydrostatycznego układu skretu bezzałogowych robotów mobilnych w kontekście zastosowania w systemie podążania za przewodnikiem. Przeanalizowano wymagania stawiane w tym zakresie przez wojsko. Omówiono stosowane systemy monitorujące otoczenie samochodów osobowych oraz koncepcję systemu wspomagania sterowania bezzałogową platformą lądową i wyniki badań intensywności skretu platformy w porównaniu z typową maszyną budowlaną.

WSTĘP

Budowa lekkiej bezzałogowej platformy lądowej przeznaczonej do wsparcia drużyny piechoty wymaga podjęcia wielu prac badawczych. Jednym z problemów jest zdolność podążania za przewodnikiem oraz opracowanie systemu lokalizowania i wyznaczania trasy obiektu poprzedzającego. Przewodnik powinien przemieszczać się w odległości kilku metrów przed pojazdem, a na drodze łączącej człowieka z platformą nie mogą znajdować się żadne przeszkody, ponieważ przewodnik wyznacza drogę dla platformy, a w chwili rozpoczęcia ruchu, nie ma zdefiniowanej ścieżki pomiędzy nimi. Przewodnik musi więc podczas marszu wybierać trasę, którą będzie mógł pokonać również platforma. Wymagane jest, aby platforma poruszała się po wyznaczonej ścieżce i utrzymywał stałą odległość za przewodnikiem, w tym celu musi przez cały czas aktualizować współrzędne położenia przewodnika za pomocą systemu lokalizowania. Czas reakcji wszystkich układów sterujących i napędowych wpływa na opóźnienie reakcji na zmianę położenia przewodnika, co powoduje, iż bezzałogowa platforma lądowa nie przemieszcza się dokładnie po wyznaczonej ścieżce, lecz przemieszcza się obok. Jest to problem nadążności maszyny za człowiekiem. Określenie występujących barier i ograniczeń, jest niezbędne dla opracowania nowych rozwiązań, tworzących funkcjonalną całość i pozwalających na efektywną realizację przewidywanych zadań w warunkach trudnych dla człowieka. Konieczne w tym celu jest zapewnienie autonomicznego podążania platformy za przewodnikiem oraz zapewnienie mechanizmów pozwalających na zlokalizowanie przewodnika przez platformę. Lokalizacja polega na pomiarze odległości przewodnika od platformy i jego azymutu (rys.1). Należy zapewnić wymaganą dokładność i wiarygodność pomiarów, przy zapewnieniu wymaganych zasięgów detekcji. Niezbędne jest zapewnienie lokalizacji przy bezpośredniej widoczności pomiędzy platformą i przewodnikiem, lecz wskazana jest również lokalizacja bez widoczności, co może być przydatne np. podczas pracy w lesie, zaroślach, wysokiej trawie lub terenie zurbanizowanym. Pożądane jest również rozróżnianie w grupie kilku maszerujących przewodnika, w przypadku wykorzystywania grupy żołnierzy.



Rys. 1. Zobrazowanie podążania za przewodnikiem

1. STOSOWANE W MOTORYZACJI SYSTEMY WSPOMAGANIA KIEROWCÓW

Na cywilnym rynku motoryzacyjnym, z systemów, które monitorują otoczenie samochodów osobowych, korzystamy na co dzień nie mając często świadomości ich działania. W tym rozdziale przedstawione zostały najpowszechniejsze systemy wspierania kierowcy. Poniżej podano przykładowe stosowane techniki radarowe i ultraszerokopasmowe.

Technologia radarów ultradźwiękowych.

Radary ultradźwiękowe są bardzo powszechnie wykorzystywane w technice motoryzacyjnej, w celu monitorowania bliskiego otoczenia pojazdów, szczególnie w czasie parkowania i wykonywania manewrów z małą prędkością. Składa się on z kilku nadajników-odbiorników, modułu sterującego i zobrazowania. Radiowa technologia radarowa.

Radiowe czujniki radarowe są coraz powszechniej wykorzystywane w systemach wspierania kierowcy. Popularnym rozwiązaniem jest radar tylny i przedni. Czujnik radarowy średniego zasięgu MRR (Mid Range Radar) jest bistatycznym radarem wielofunkcyjnym posiadającym cztery niezależne kanały odbiorcze i cyfrowe wiązki. Radar wykorzystuje dedykowane zastosowaniom motoryzacyjnym pasmo częstotliwości 76-77 gigaherców. Wersja do zastosowań z przodu pojazdu ma kąt detekcji +/- 45 stopni oraz zasięg do 160 metrów. Czujnik radarowy średniego zasięgu w wersji do montażu z przodu jest wykorzystywany w układzie kontroli prędkości i odległości oraz inteligentnym układzie hamowania awaryjnego. Radiowa technologia ultraszerokopasmowa.

Technologia ultraszerokopasmowa UWB (Ultra Wideband) dzięki stosowaniu bardzo krótkich impulsów radiowych umożliwia zapewnienie transmisji danych i pomiaru odległości. Uzyskane zasięgi, przy zachowaniu bezpośredniej widoczności pomiędzy antenami i braku zakłóceń sięgają kilkuset metrów, a możliwa do uzyskania szybkość transmisji dochodzi do kilku Mb/s. Dokładności pomiaru odległości są uzależnione od odległości, zastosowanych anten i wzmacniaczy, przeszkód w I strefie Fresnela, występujących odbić sygnału, poziomu zakłóceń i szumów i zastosowanych algorytmów obliczeniowych.

Systemy te pracują w zdefiniowanych warunkach oraz są kontrolowane przez kierowcę. Mają za zadanie wspomagać i ostrzegać kierującego o przeszkodach znajdujących się na drodze. Autonomiczny robot potrzebuje systemu, który oprócz wykrycia problemu, podejmie decyzję i będzie sterował robotem. Powinien ominąć przeszkodę nie tylko zatrzymać się tuż przed nią.

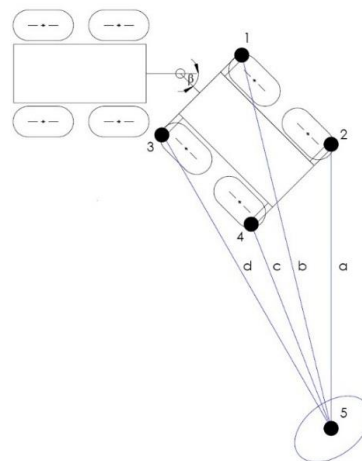
2. KONCEPCJA WSPOMAGANIA STEROWANIA PLATFORMĄ DLA POTRZEB WOJSKA

Dla potrzeb wojska, systemy muszą spełniać bardziej wymagające kryteria zważywszy na otoczenie w jakim przychodzi pracować bezzałogowym platformą lądowym (BPL). Są to systemy nawigacji i autonomii, które powinny być opracowane tak aby łączyły wymagania stawiane przez nowoczesne wojsko. Analizowana w pracy bezzałogowa platforma lądowa jest przegubowym pojazdem kołowym z hydrostatycznym układem napędowym.

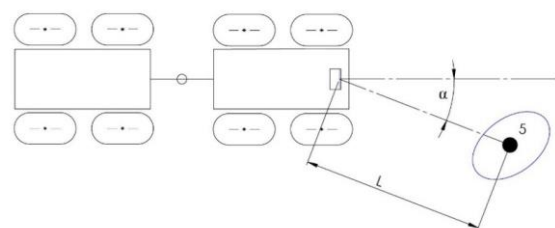
Układ napędowy platformy, która ma towarzyszyć żołnierzom, rozwija siłę napędową o wartości co najmniej równej sile przyczepności układu bieżnego na podłożu o wysokiej wartości współczynnika przyczepności, uwzględniając masę ładunku i osprzętów. Również w terenie o niskiej nośności z nominalnym obciążeniem powinna cechować się bardzo dobrymi zdolnościami pokonywania tego terenu. Bezzałogowe platformy poruszają się z prędkością idącego lub biegnącego żołnierza w przybliżeniu 12 km/h, a pożądane jest rozwijanie prędkości 15 km/h - na podłożach utwardzonych. Powinna mieć stateczność poprzeczną umożliwiającą jej poruszanie się i manewrowanie na zboczu o nachyleniu co najmniej 30 % (18°), a pożądana jest zdolność do poruszania się i manewrowania na zboczu o nachyleniu 60 % (31°). Platforma powinna mieć stateczność wzdłużną umożliwiającą poruszanie się po zboczu o nachyleniu co najmniej 30° oraz pokonywać ścianki pionowe (krawężniki) o wysokości do 0,2 m. Kąty wjazdu i zjazdu platformy bazowej powinny wynosić min. 30°. Wszystkie te wymagania ukazują skalę problemu zapewnienia wszystkich wytycznych jednocześnie uwzględniających podążanie za przewodnikiem.

Posiadając informacje o wymaganiach które musi spełnić układ napędowy, należy opracować wymagania dla systemu sterowania platformy. Praca w ciężkim terenie wiąże się z wieloma wyzwaniem dla takiego systemu. Potrzebne są w tym celu informacje umożliwiające poprawną jego pracę. Powinien być w stanie określać własne położenie i współrzędne wykrytych obiektów z dokładnością +/- 0,5 m oraz umożliwiać poruszanie się za przewodnikiem (rys.2). System nawigacji powinien być przystosowany do odbierania danych z BPL-a w celu modyfikacji wytyczanej trasy (rys. 3). Aktualnie stosowane rozwiązania wykorzystują wojskową nawigację satelitarną systemów GPS oraz skanerów laserowych o zasięgu pracy 50 m oraz czujników radarowych o zasięgu pracy 30 m przy sprzyjających warunkach pogodowych. System autonomicznego podążania za przewodnikiem powinien kopiować jego trasę przemarszu

z dokładnością do 0,3 m zachowując trajektorię oraz utrzymywać bezpieczną odległość, która zależy od prędkości ruchu przewodnika. System powinien omijać pojawiające się przeszkody (ludzi, zwierzęta) lub zatrzymywać platformę nie dopuszczając do kolizji. Za prawidłowy dobór korytarza ruchu odpowiedzialny jest przewodnik. Platforma powinna nadążać za przewodnikiem nie wykonując gwałtownych zmian kierunku ruchu, poruszającym się z prędkością którą osiąga, wcześniej zdefiniowaną wartością 12 km/h. Jednocześnie powinien nadążać za przewodnikiem poruszającym się z prędkością do 6 km/h, wykonującym gwałtowne zmiany kierunku ruchu. W tym celu, na bieżąco musi być mierzona odległość platformy od przewodnika określając wzajemną lokalizację za pomocą czterech czujników (1-4) (rys.2) zamontowanych na platformie, które mierzą odległość a, b, c, d od czujnika (5), który posiada przewodnik. Komputer przetwarzając informacje z czujników wyznacza kierunek podążania platformy za przewodnikiem. Określony jest kąt α opisany pomiędzy kierunkiem jazdy platformy, a kierunkiem przewodnika oraz jego określoną odległość L (rys.3). Parametry te są wytycznymi dla systemu sterowania hydrostatycznego układu napędowego. Odległość L determinuje prędkość platformy, to znaczy daje informację czy należy przyspieszyć czy zwolnić, gdyż zbliżył się za bardzo do przewodnika. Kąt α natomiast jest informacją dla układu skrętu. Przyjęto platformę przegubową o sterowaniu hydraulicznym. Gdy zwiększa się kąt α , układ skrętu musi reagować. Odbywa się to za pomocą odpowiedniego przesunięcia się tłoczków siłowników odpowiadających za skręt i wzajemne położenie względem siebie członów pojazdu – kąt β (rys.2). System sterowania musi zapewnić wymagany skręt zależny od kąta α , pokonując opory ruchu kół w relacji z podłożem. System lokalizacji na bieżąco dostarcza nowe dane, ponieważ koła mogą być w poślizgu lub mogły napotkać na przeszkodę uniemożliwiając osiągnięcie zamierzonego kierunku jazdy i wymagana jest korekta.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników



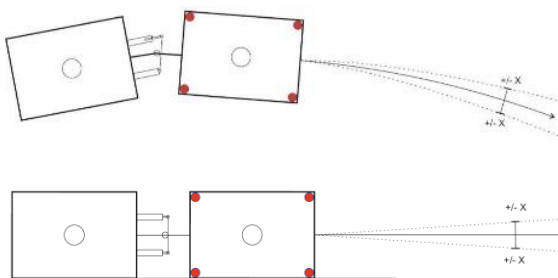
Rys. 3. Kluczowe parametry zmienne

3. ALGORYTM STEROWANIA PLATFORMĄ

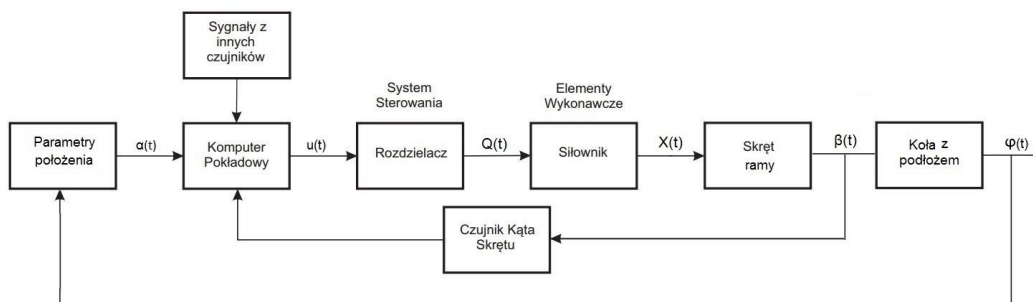
Pojazdy podwyższonej mobilności wyposażone w sprzęg odznaczają się szerokimi możliwościami manewrowymi, tzn. niewielkim promieniem skrętu oraz zdolnością poruszania się po trudnym terenie. Szczególnie istotnym parametrem z uwagi na zwrotność pojazdu jest kąt skrętu członów względem siebie. W celu wyznaczenia maksymalnych obciążeń oraz sił niezbędnych do wykonania skrętu należy oszacować opory występujące podczas zawracania pojazdu. Z uwagi na zapewnienie wysokiej zwrotności pojazdu przyjęto, że dopuszcza się wykonywanie manewru skrętu podczas jego postoju na podłożu o wysokim współczynniku przyczepności. Za realizację procesu skrętu sprzęgu hydraulicznego odpowiada część układu sterowania siłownikami skrętu. Siłowniki te połączone są w sposób krzyżowy zapewniający jednakową powierzchnię czynną siłowników dla dwóch kierunków skrętu sprzęgu. Układ sterowania siłownikami skrętu powinien zapewnić zdolność realizacji następujących funkcji:

- swobodny skręt sprzęgu,
 - usztywnienie skrętu w zadanej pozycji,
 - skręt sprzęgu realizowany za pomocą elementów wykonawczych.
- Funkcje te realizowane są poprzez odpowiednie przesterowanie rozdzielacza hydraulicznego.

Schemat na rysunku 4, przedstawia ogólny algorytm sterowania układem skrętu bezzałogową platformą lądową. Robot musi podążać za swoim przewodnikiem realizując tą samą ścieżkę poruszania się. W tym celu należy uwzględniać na bieżąco współrzędne operatora, które są przetwarzane przez komputer pokładowy, zestawiając je z sygnałami z czujników położenia pojazdu i ustawieniem względem siebie członów przegubowej platformy. Sygnał wygenerowany przez komputer pokładowy, steruje rozdzielaczem proporcjonalnym, zmieniając położenie siłowników i tym samym uzyskujemy zmianę kąta skrętu aż do uzyskania oczekiwanego promienia skrętu.

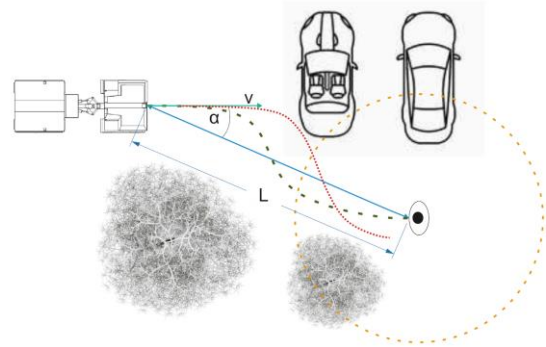


Rys. 5. Błąd dokładność utrzymania toru jazdy



Rys. 4. Algorytm sterowania układem skrętu bezzałogowej platformy lądowej

Biorąc pod uwagę zdefiniowane wymagania odnośnie kinematyki poruszania się pojazdu należy uwzględnić dokładność wskazywania parametrów przez zastosowane czujniki kąta skrętu (rys.5), co znacząco wpływa na dokładność uzyskania zamierzonej trajektorii. Błąd zwiększa się wraz z odległością. Ważne staje się więc stosowanie urządzeń wysokiej dokładności.



Rys. 6. Odchylenie podaźania robota od wyznaczonej trajektorii

Omijający przeszkody przewodnik (rys.6) wytycza tym samym trajektorię ruchu dla platformy (zielona kropkowana linia). Natomiast platforma ze względu na występowanie opóźnień w układzie podąża z pewnym odchyleniem od wymaganej trajektorii (czerwona kropkowana linia), co w efekcie może doprowadzić do kolizji z przeszkodą.

4. BADANIA PRĘDKOŚCI SKRĘTU

Przeprowadzono badania identyfikacyjne wymuszeń na układ skrętu maszyny podczas pokonywania toru testowego ze słupkami rozstawionymi w równych 6 m odległościach (rys.7) i stałej prędkości jazdy podczas całego przejazdu. Badanie wykonano dla maszyny budowlanej jaką jest przegubowa ładowarka kołowa Terex (rys.8) o maksymalnym kącie skrętu wynoszącym 40° oraz przegubowej bezzałogowej platformy lądowej Dromader (rys.10) o maksymalnym kącie skrętu 60°.

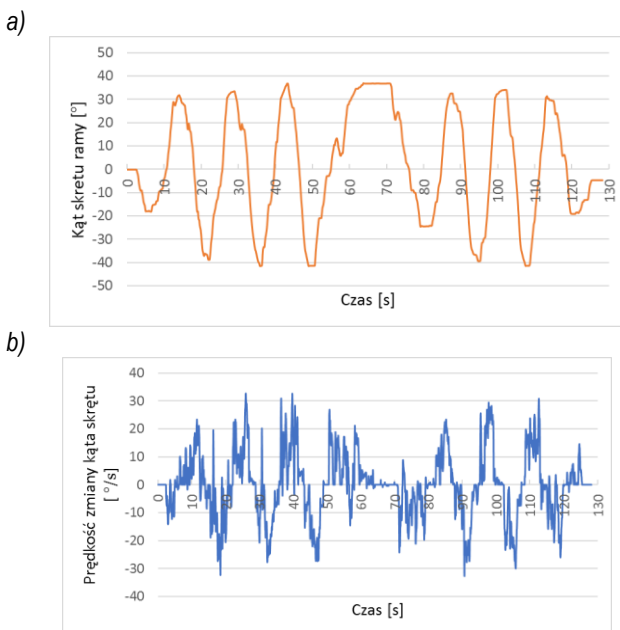


Rys. 7. Tor do jazdy slalomem



Rys. 8. Przegubowa ładowarka kołowa użyta do badań- Terex TL 65

Badania wykonano przy prędkości jazdy przybliżonej do prędkości maszerującego żołnierza ~ 5 km/h. Badanie powtórzone było przez 6 operatorów. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy wynik uzyskanego kąta skrętu oraz prędkości jego zmiany dla ładowarki manewrującej pomiędzy słupkami, zawróceniu na końcu toru i powtórzenie slalomu w drodze powrotnej. Uzyskiwany kąt skrętu nie osiąga maksymalnej wartości i podczas omijania słupków wynosi średnio 33° . Średnie prędkości skrętu ramy są na poziomie $20 - 30$ $^\circ/s$. Na intensywność skrętu znacząco wpływa szybkość kręcenia kołem kierownicy i refleks operatora oraz jego własne odczucie i umiejętności pokonywania toru.

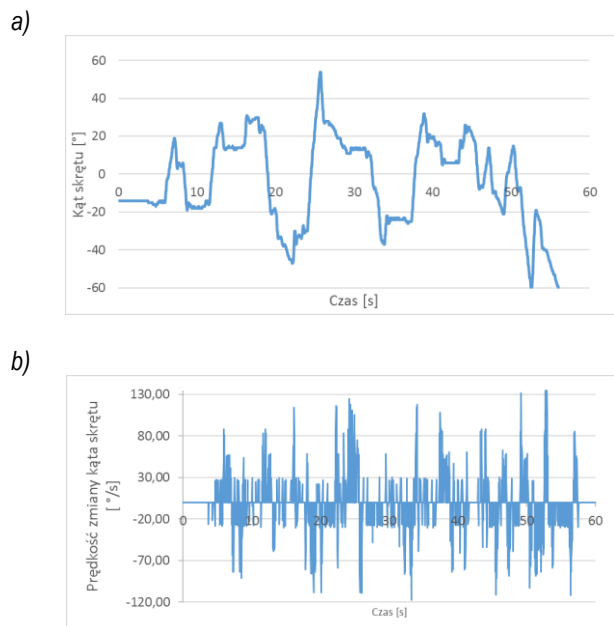


Rys. 9. Wyniki dla przegubowej ładowarki kołowej w funkcji czasu: a) kąt skrętu, b) prędkość zmiany kąta skrętu



Rys.10. Przegubowa bezzałogowa platforma – Dromader podczas slalomu

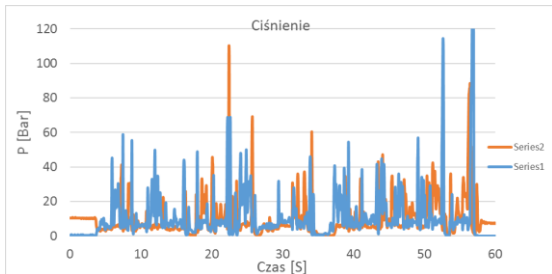
Następnie, analogiczne badanie przeprowadzono z wykorzystaniem zdalnie sterowanej bezzałogowej platformy lądowej Dromader. Operator w tym przypadku nie jedzie na maszynie lecz z dogodnej odległości za pomocą kontrolera PC kieruje platformą. Powoduje to iż nie ma wycucia osiąganego kąta skrętu i dokładnego położenia platformy względem słupków na torze testowym. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano przebieg zmiany kąta skrętu z częstymi poprawkami oraz wyższej amplitudzie. Na rysunku 11a, można zaobserwować, że uzyskiwany skręt ramy jest nie regularny ze względu na liczne poprawki operatora i osiąga średnio $\pm 30^\circ$, a także osiągnięty jest maksymalny kąt skrętu wynoszący 60° .



Rys. 11. Wyniki dla przegubowej bezzałogowej platformy w funkcji czasu: a) kąt skrętu, b) prędkość zmiany kąta skrętu

Na rysunku 11b natomiast przedstawiono prędkości skrętu. Średnio prędkość skrętu wynosi 30 $^\circ/s$ lecz można zaobserwować, że występowanie znaczących zmian kąta skrętu wynoszące nawet 135 $^\circ/s$, co w porównaniu z maszyną budowlaną, gdzie maksymalna prędkość wynosiła 35 $^\circ/s$, oznacza to duże obciążenie dla kierowcy. Analizując ciśnienie oleju hydraulicznego w układzie skrętu platformy lądowej Dromader, zaobserwowano liczne skoki ciśnienia osiągające

wartość 120 Barów. Średnia wartość ciśnienia podczas wykonywania skrętu wynosi natomiast 35 - 40 Barów, są to bardzo niskie ciśnienia ale należy mieć na uwadze fakt, że platforma poruszała się ze stałą prędkością po równym podłożu o małych oporach ruchu.



Rys.12. Przebieg czasowy ciśnienia w silownikach skrętu

PODSUMOWANIE

Bezzałogowe platformy lądowe sterowane są za pomocą zdalnego systemu sterowania. Powoduje to, że operator ma utrudnioną ocenę odległości, prędkości jazdy i uzyskiwanego kąta skrętu ramy robota. W ramach przeprowadzonych badań nie uwzględniono pozostałych parametrów pracy platformy, których określenie przez operatora jest utrudnione i musi opierać się wyłącznie na wskazaniach wyświetlanych na pulpicie sterowania tj. prędkości obrotowej i obciążenia silnika, przechyłu platformy itp. Oceniając wymagania dla hydrostatycznego układu skrętu w systemie bezzałogowego sterowania robotów mobilnych, zaóważalna jest konieczność opracowania pokładowych systemów sterowania kątem skrętu platformy bezzałogowej, które będą autonomicznie wspierały operatora w procesie kierowania, co pozwoli osiągnąć niższe maksymalne wartości kątów skrętu i ograniczenie prędkości jego zmian. Spowoduje to łatwiejszą integrację z systemem podążania za przewodnikiem.

PODZIĘKOWANIA

Prace opisane w niniejszym artykule zostały zrealizowane w ramach grantu nr DOBR-BIO4/083/13431/2013 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

BIBLIOGRAFIA

1. Szydelski Z.: *Napęd i sterowanie hydrauliczne w pojazdach i samojezdnych maszynach roboczych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1980 r.
2. Projekt badawczy *Bezzałogowy pojazd do wykonywania zadań specjalnych w strefach zagrożenia*,
3. Projekt Badawczy *Kształtowanie struktur układów zawieszenia członowego i jazdy lekkich bezzałogowych platform lądowych ekstremalnej mobilności*, 2010 r.
4. Konopka S., Łopatka M.: *Podstawy konstrukcji Maszyn CAD, Modelowanie Ruchu Maszyn WAT*, Warszawa 2005r.

Assessment requirements for hydrostatic steering system in system follow me unmanned mobile robots

The article discusses the requirements for the hydrostatic system of turning unmanned mobile robots in the context of using the system to follow the guide. The requirements set in this regard by the army were analyzed. Exchange car monitoring systems for cars. The control system of the unmanned ground platform and the results of tests on the intensity of the platform's turn compared to a typical construction machine are discussed.

Autorzy:

mgr inż. **Karol Kończalski** - Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, tel.: +48 261-837-416, e-mail: karol.konczalski@wat.edu.pl

mgr inż. **Piotr Krogul** - Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, tel.: +48 261-837-107, e-mail: piotr.krogul@wat.edu.pl

mgr inż. **Mirosław Przybysz** - Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, tel.: +48 261-837-107, e-mail: miroslaw.przybysz@wat.edu.pl

dr inż. **Rafał Typiak** - Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Budowy Maszyn, tel.: +48 261-837-306, e-mail: rafal.typiak@wat.edu.pl

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.193

Data zgłoszenia: 2018.05.25 Data akceptacji: 2018.06.15