

Andrzej TYPIAK ¹
Rafał TYPIAK ²
Stanisław KONOPKA ³

PROBLEMY DOBORU SYSTEMU WIZYJNEGO DLA BEZZAŁOGOWYCH MASZYN INŻYNIERYJNYCH

W referacie zaprezentowano wybrane problemy powstające podczas doboru systemu wizyjnego dla teleoperowanych bezzałogowych maszyn inżynieryjnych. Przedstawiono także możliwe sposoby ich rozwiązania, testy porównawcze, oraz przykład wykorzystania tych doświadczeń przy opracowywaniu układu wizyjnego dla inżynieryjnego robota wsparcia powstającego w Katedrze Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej.

PROBLEMS WITH DEVELOPING A VISION SYSTEM OF UNMANNED ENGINEERING MACHINES

This paper showcases several chosen problems which has to be faced while developing a vision system for teleoperated unmanned engineering machines. Several possible solutions to each of these problems had been presented. Additionally, this paper present an example of presented knowledge being used in real life applications such as a vision system for an engineering support robot which is being developed in the Machine Building Division of the Military University of Technology

1. WSTĘP

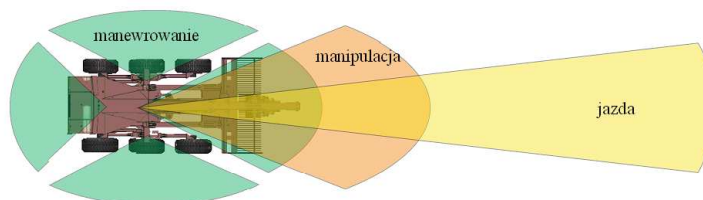
Wprowadzenie do użytku bezzałogowych maszyn inżynieryjnych wymaga opracowania, nie tylko nowych układów wykonawczych, ale także systemów wizualizacji otoczenia dla tych maszyn. Rozwiązania te powinny spełniać następujące funkcje (rys.1):

- dostarczania informacji dotyczących trasy przejazdu;
- obserwacji osprzętu roboczego i miejsca jego pracy;
- obserwacji terenu wokół pojazdu podczas manewrowania.

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2,
e-mail: atypiak@wat.edu.pl

²Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2,
e-mail: rtypiak@wat.edu.pl

³Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2,
e-mail: skonopka@wat.edu.pl



Rys.1. Obszary, które muszą być obserwowane podczas realizowania odpowiednich zadań przez pojazd

System wizyjny bezałogowej maszyny inżynierskiej powinien być tak dobrany, aby zapewnić operatorowi osiągnięcie funkcjonalności w sterowaniu pojazdem na poziomie takim jak w przypadku sterowania bezpośrednio z pojazdu. Podstawowymi elementami systemu wizyjnego są: kamery – główny komponent zbierający informacje o bezpośrednim otoczeniu maszyny, łącze wideo – medium transmisji danych pomiędzy pojazdem, a operatorem, oraz interfejs operatora (HMI - Human Machine Interface) – zasadniczy element stanowiska operatora.

Zakłada się, że docelowym środowiskiem pracy maszyny inżynierskiej będą nie tylko drogi i tereny otwarte, lecz także tereny zalesione, rumowiska skalne i tereny miejskie [1]. Tego rodzaju teren charakteryzuje się nie tylko znacznymi zmianami w wysokości, lecz także znaczną ilością przeszkód terenowych. Implikuje to konieczność wykorzystania łącza bezprzewodowego jako podstawowego medium transmisji danych sterujących, wizualnych, oraz parametrów pracy maszyny. W przypadku użycia łącza przewodowego w tego rodzaju terenie pojawia się możliwość rozerwania go, poprzez zakleszczenie w szczelinie, owinięcie naokoło przeszkody terenowej, lub (co jest najczęstszym przypadkiem) najechanie na przewód przez inny obiekt, bądź samą maszynę inżynierską. Rozwiązania przewodowe mogą być stosowane w przypadku jednostek poruszających się z prędkościami do 4km/h, gdzie proces rozwijania i nawijania medium transmisyjnego może być nadzorowany jednocześnie z procesem sterowania pojazdem. W przypadku maszyn przemieszczających się ze znacznie większymi prędkościami, takie rozwiązanie może ostatecznie doprowadzić do wypadku i uszkodzenia medium transmisyjnego bądź też i samej maszyny.

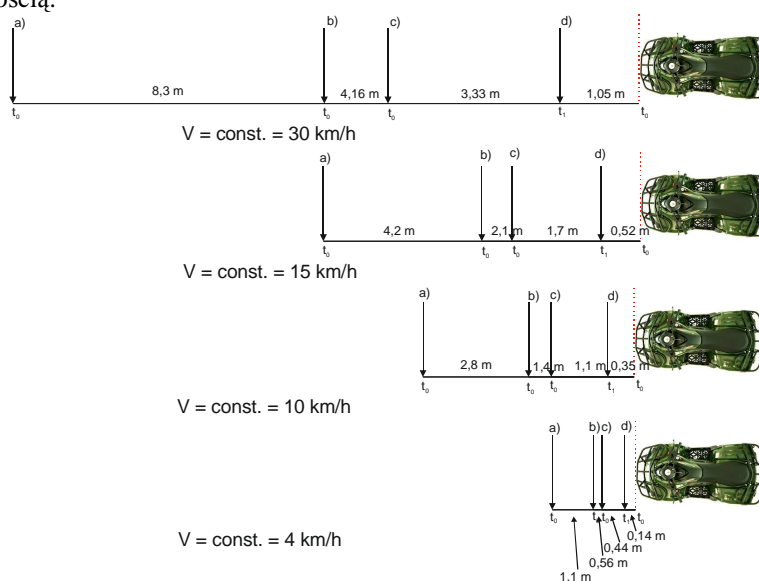
Ponieważ nie istnieją maszyny, które przeznaczone byłyby do pracy w każdych warunkach i do wykonywania szerokiego spektrum zadań, takie same kryteria odnoszą się do mobilnych systemów wizyjnych. Podyktowane jest to w dużej mierze kosztami. Wartość takiego systemu byłaby porównywalna z wartością samej maszyny. Sprecyzowanie wymagań stawianych maszynie według opisanych poniżej kryteriów pozwoli tak dobrać elementy systemu wizyjnego, aby mógł on w pełni wykorzystać możliwości pojazdu, jednocześnie ograniczając jego koszty do minimum.

2. PROBLEM OKREŚLENIA DOPUSZCZALNEGO OPÓŹNIENIA SYSTEMU WIZYJNEGO

Podstawowym problemem podczas sterowania maszyny zdalnie, w układzie teleoperacji jest opóźnienie jakie pojawia się pomiędzy czasem zarejestrowania obrazu przez kamerę a czasem wyświetlenia obrazu na monitorze operatora. Wartość tego opóźnienia może się zmieniać od kilkudziesięciu milisekund do kilku sekund. Najniższe wartości opóźnień pojawiają się przy wykorzystaniu analogowych torów wideo, gdzie obraz nie jest poddawany obróbce przed wysłaniem. Są one jednak bardzo podatne na wszelkiego rodzaju zakłócenia. W przypadku łączy cyfrowych, można zaobserwować lepszą odporność na zakłócenia, niestety kosztem większego opóźnienia pomiędzy pobraniem obrazu, a jego wyświetleniem. Wynika to z faktu, że obraz poddawany jest wielokrotnemu przetworzeniu: od rejestracji na matrycy, poprzez cyfryzację, kompresję i kodowanie obrazu w nadajniku, transmisję drogą radiową do odbiornika, odkodowanie i dekompresję, po wyświetlenie obrazu na matrycy wyświetlacza.

2.1 Problemy podczas kierowaniem maszyną

Opóźnienia wywołane przesyłaniem sygnału cyfrowego drogą radiową mają ogromny wpływ na możliwości robocze bezzałogowej maszyny inżynierskiej. Efekty tego zjawiska obrazuje rysunek 2, na którym przedstawiono drogę jaką przebywa pojazd w czasie opóźnienia wywołanego przez proces transmisji obrazu, dla pojazdu poruszającego się ze stałą prędkością.

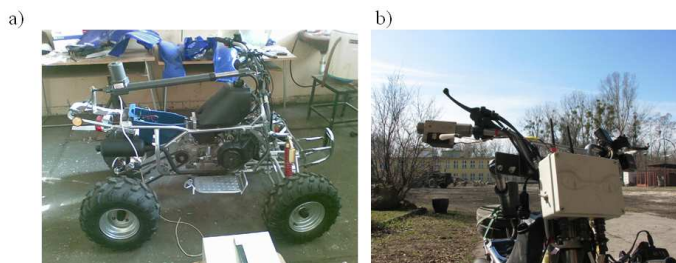


Rys.2. Odległość przebyta przez pojazd bezzałogowy w czasie wyświetlania operatorowi obrazu z chwili czasowej t_0 dla systemów wizyjnych z opóźnieniem: a - 1s; b - 0,5 s; c - 0,4 s; d - 0,126 s

Analizując przedstawione dane (rys. 2) widać, że w przypadku wykorzystywania łącza z opóźnieniem rzędu sekundy, poruszanie się w trudnym terenie, gdzie nierówności terenu są widoczne dopiero po zbliżeniu się do nich na bliską odległość, 8 m „martwej przestrzeni” – czyli takiej, którą przebywa maszyna zanim operator może zmienić jej stan, może oznaczać poważne kłopoty dla maszyny i otoczenia. Tego typu opóźnienia rejestruje się w przypadku korzystania z kamer IP lub serwerów wideo, które zamieniają obraz analogowy do postaci cyfrowej, a następnie przesyłają go drogą radiową w standardzie Ethernet. Bardzo dobre kamery IP mogą osiągać opóźnienia od 0,5 s. Jest to dużo lepszy wynik niż w pierwszym przypadku, lecz w sytuacji gdy droga hamowania maszyn inżynieryjnych poruszających się z prędkości 30km/h wynosi około 9 m, powoduje to wydłużenie efektywnej drogi hamowania prawie o połowę. Trzeci rodzaj łącza nadawczo – odbiorczych, charakteryzujący się opóźnieniem rzędu 400 ms, stanowią nadajniki wideo do transmisji „na żywo”. Są to rozwiązania szeroko stosowane w telewizji. Ich opóźnienie powoduje wydłużenie drogi hamowania przytoczonego wyżej pojazdu o ~30%. Ostatnim prezentowanym rozwiązaniem jest dedykowane łącze nadawczo-odbiorcze do rozwiązań mobilnych. Jego użycie wydłuża efektywną drogę hamowania o ok. 11%.

W ramach prac badawczych przeprowadzono testy sterowania pojazdem z wykorzystaniem różnych nadajników wideo. W przypadku prac manipulacyjnych, gdzie nie zachodzi potrzeba wykonywania złożonych ruchów osprzętem roboczym, opóźnienia rzędu 1s nie wpływają znacząco na efektywność wykonywanych zadań. Jednakże w razie podejmowania niebezpiecznych i potencjalnie groźnych dla otoczenia i maszyny przedmiotów, układ wizyjny powinien umożliwić operatorowi jak najwcześniejszą reakcję na potencjalnie niebezpieczne sytuacje.

W przypadku sterowania jazdą maszyny, przeprowadzono testy na różnych pojazdach. Pierwszym był test łącza analogowych, które posiadają najmniejsze opóźnienia. Zamontowane one były na pojeździe quad Raptor 150 (rys. 3).



Rys.3. Quad Raptor 150: a - widok zamontowanego układu skrzętu b - widok układu zdalnego sterowania

Na tym pojeździe przetestowano łącza radiowe pracujące w paśmie 2,4GHz, w celu oceny możliwości zdalnego sterowania pojazdem kołowym poruszającym się z prędkością ok. 30 km/h. Testy wykazały, że takie rozwiązanie jest możliwe, lecz jakość sygnału wideo znacznie pogarsza się przy prędkościach powyżej 15km/h (rys. 4).



Rys.4. Test dwóch nadajników podczas jazdy z prędkościami powyżej 15 km/h: po lewej obraz z nadajnika pracującego na częstotliwości 1,3GHz, po prawej na częstotliwości 2,4GHz

Następnym etapem testów były badania łącza cyfrowego wprowadzającego opóźnienie rzędu ~130 ms pracujące w paśmie 1490 MHz. Jakość obrazu była zdecydowanie lepsza, a opóźnienie wywołane konwersją sygnału nie wpływało na efektywność sterowania.

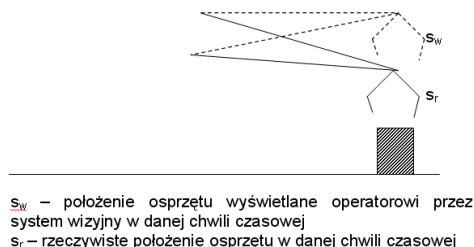
Trzecim testowanym rozwiązaniem było łącze Ethernetowe z wykorzystaniem serwerów wideo. Układ ten był zamontowany na pojeździe Lewiatan 3 (rys. 5). Niestety, w tej konfiguracji, sterowanie pojazdem z prędkościami przekraczającymi 10 km/h było utrudnione.



Rys.5. Pojazd Lewiatan 3 z zamontowanym łączem Ethernetowym i kamerami pomiędzy reflektorami oraz z głowicą obserwacyjną

2.2 Problemy podczas sterowaniem osprzętem roboczym maszyny inżynierskiej

Problem opóźnień łącza wideo jest także obserwowalny podczas prac osprzętami (rys.6) roboczymi. Zważywszy jednak na prędkości wykonywania ruchów roboczych, wpływ ten jest mniejszy niż w przypadku kierowania pojazdem



S_w – położenie osprzętu wyświetlane operatorowi przez system wizyjny w danej chwili czasowej
 S_r – rzeczywiste położenie osprzętu w danej chwili czasowej

Rys.6. Zobrazowanie położenia rzeczywistego osprzętu roboczego, oraz położenia obserwowanego w tej samej chwili czasowej przez operatora

Do testów wpływu opóźnień wykorzystano stanowisko zdalnego sterowania osprzętem roboczym. Testowano pewne stałe ustawienie kamer przy wykorzystaniu różnego rodzaju łącz wideo. Badania obejmowały analizę tych samych typów łącz wideo co w przypadku kierowania pojazdem. Metodyka przewidywała podejmowanie różnego rodzaju obiektów rozsianych po całej przestrzeni roboczej manipulatora. Zadaniem badanego było jak najszybsze podjęcie zadanych obiektów i dostarczenie ich w zadane miejsce bez wyrządzania szkód dla obiektów manipulowanych i otoczenia. Badania te pozwoliły określić maksymalne dopuszczalne opóźnienie łącza wideo, które wynosi 400ms dla celów manipulacyjnych.

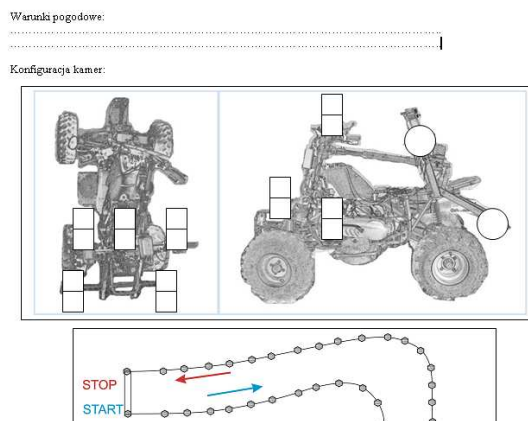
3. PROBLEM ODPOWIEDNIEJ WIZUALIZACJI OTOCZENIA MASZyny INŻYNIERYJNEJ

Sposób rozmieszczenia kamer na maszynie sterowanej w układzie teleoperacji jest krytyczne do osiągnięcia efektywności pracy porównywalnej z maszyną sterowaną bezpośrednio przez operatora. W Katedrze Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej przeprowadzono badania nad doбором ustawienia kamer na pojeździe zdalnie sterowanym. Testy przeprowadzono na pojeździe quad Raptor 150 z wykorzystaniem następujących rodzajów kamer:

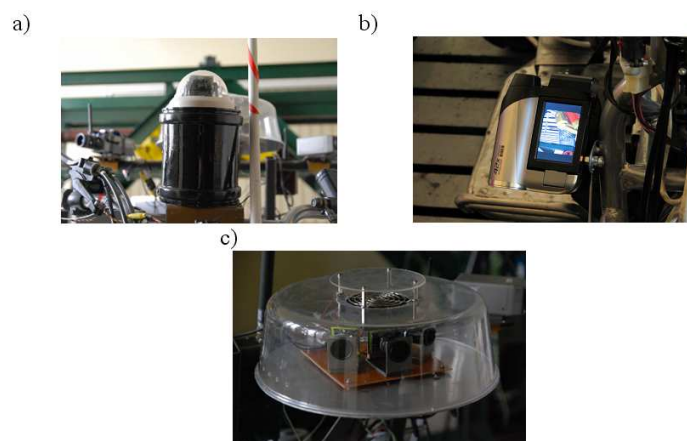
- Ręczne kamery typu 'handheld' firmy Panasonic z układem stabilizacji obrazu;
- Czarnobiałe kamery CCD;
- Kolorowe kamery CCD z matrycą 1/4";
- Kolorowe kamery CCD z matrycą 1/3".

3.1 Problemy podczas kierowaniem maszyną

W celu oceny jakości odwzorowania otoczenia, testowano różne ustawienia kamer, zarówno pojedynczych, zamontowanych w wytypowanych miejscach pojazdu (rys. 7), jak i zgrupowanych, tworzących panoramę, oraz badano wykorzystanie specjalnie zaprojektowanej głowicy obrotowej (rys.8).



Rys.7. Wycinek z ankiety dotyczącej jakości zdalnego sterowania pojazdem przy dużych prędkościach i podczas manewrowania



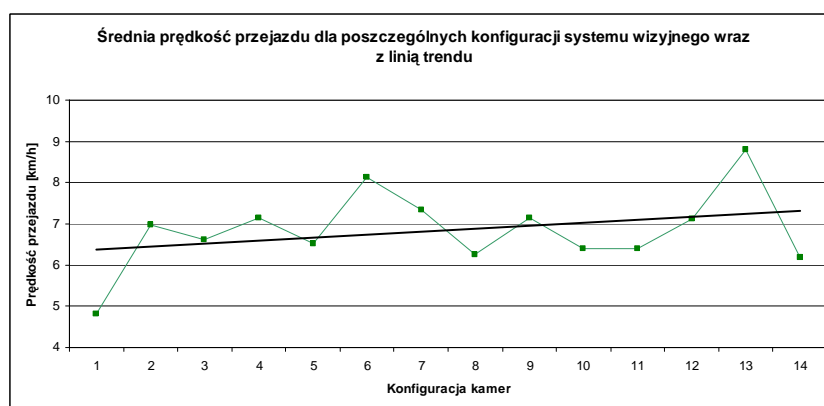
Rys.8. Rodzaje kamer wykorzystanych podczas badań systemów wizyjnych: a) głowica obrotowa, b) kamera typu 'handheld', c) głowica panoramiczna

Sprawdane ustawienia miały na celu określenie jakie elementy środowiska i pojazdu muszą być widoczne w płaszczyznach przed i za pojazdem aby móc pewnie sterować nim w zakresach prędkości od 0 do 30 km/h.

W ramach testu operator pojazdu miał pokonać zaplanowaną trasę w jak najkrótszym czasie. Teren po którym poruszał się pojazd był wytyczony za pomocą betonowych trylinek, na których najechanie było traktowane jako wyjazd poza obszar testu. Tor miał szerokość 1,8m. Podczas każdego testu, badający znajdował się w terenie razem z pojazdem. Mierzony był czas, ilość błędów podczas przejazdu, liczba wyjazdów poza wyznaczony teren oraz liczba udanych powrotów na tor badań. Informacje te miały pomóc w oszacowaniu jak operator orientuje się w przestrzeni, korzystając z konkretnego

ustawienia kamer. Po zakończonym teście operator udzielał odpowiedzi na dodatkowe pytania, np. z ilu i których kamer korzystał w przypadku jazdy na wprost, podczas manewrowania, oraz w przypadku próby powrotu na tor. Następnie do próby podchodziła kolejna osoba. Po zakończeniu jednej serii badań, zmieniane było ustawienie i kąt nachylenia kamer (jeżeli była taka możliwość), oraz ilość obrazów wideo, która była dostępna dla operatora.

Podczas testów sprawdzono 14 różnych ustawień kamer systemu wizyjnego dla 3 różnych typów kamer. Testom poddano 5 osób. Po wykonaniu dwóch serii przejazdów przez każdego operatora przerywano testy na okres dwóch dni, aby zminimalizować skutki uczenia się przez badanych zdalnego sterowania pojazdem tego typu.



Rys.8. Wykres średnich prędkości przejazdu toru testowego w zależności od konfiguracji kamer systemu wizyjnego

Rysunek 8 przedstawia sposób w jaki zmieniała się średnia prędkość przejazdu, w zależności od konfiguracji systemu wizyjnego.

Linia trendu (także widoczna na rysunku) pokazuje, że nie ma zauważalnego wzrostu prędkości przejazdu w zależności od liczby wykonanych przejazdów. Wynika to z faktu, że kształt toru jak i kierunek w którym operator musiał go pokonać, był zmieniany (przy zachowaniu stałego poziomu skomplikowania – tzn. liczba zakrętów i przeszkód terenowych była stała).

3.2 Problemy podczas sterowaniem osprzętem roboczym

Do badania wpływu ustawienia kamer na sposób odwzorowania otoczenia osprzętu roboczego maszyny inżynierskiej wykorzystano stanowisko zdalnego sterowania osprzętem. W czasie testów badano różne sposoby umiejscowienia kamer aby jak najlepiej wizualizowały one pełne pole pracy osprzętu, oraz dostarczały jak najdokładniejszego obrazu odnośnie obiektów manipulacji i orientacji osprzętu względem nich.

4. WNIOSKI

Po przeanalizowaniu przeprowadzonych testów stwierdzono, że najlepsze wyniki przy poruszaniu się w terenie otwartym oraz podczas manewrowania daje obraz z kamer w układzie panoramy, które dostarczają informacji zarówno o otoczeniu pojazdu jak i o kącie skrętu kół. Jest to bardzo ważna informacja, gdyż najważniejszą informacją dla operatora podczas manewrowania była właśnie ta wielkość. Zaobserwowano tą prawidłowość także w przypadku, gdy jedna z kamer była umieszczona na kierownicy i obracała się wraz z osią skrętną pojazdu. Prędkości przejazdów przy tej konfiguracji były wyższe w stosunku do średniej prędkości pozostałych przejazdów dla każdego z testowanych ustawień, przy czym różnica ta była większa o ok. 10% od wartości średniej. Ponieważ inżynierski robot wsparcia nie posiada osi skrętnych, lecz skręt burtowy – kamery na pojeździe dają informację wizualną podobną do tej, gdy kamera pokazuje aktualny kierunek pojazdu.

Testy wykazały także duży potencjał wykorzystania głowicy obrotowej. Wynikał on z opinii operatorów, że jest to najbardziej naturalny sposób prezentacji informacji wizualnej przy sterowaniu maszyną. Jednakże z powodu problemów z dokładnością sterowania (opracowano system śledzący ruch głowy operatora) i wagą układu wizualizacji zakładanego przez operatora, układ ten stwarzał bardzo dużo trudności podczas wykonywania zadań przewidzianych w testach.



Rys.9. Inżynierski robot wsparcia z systemem wizyjnym: a) trzy kamery tworzące panoramę; b) dwie kamery pomocnicze/cofania; c) jedna kamera w chwytaku

Na podstawie wyników badań opracowano system wizyjny (rys. 9) dla inżynierskiego robota wsparcia składający się z:

- trzech kamer tworzących panoramę, znajdujących się na pałąku górnym;
- dwóch kamer bocznych pełniących funkcje wspierania operatora podczas prac manipulacyjnych;
- jednej kamery umieszczonej wewnątrz manipulatora, która pełni dodatkową funkcję kamery inspekcyjnej, pozwalającej dokładniej obejrzeć interesujący operatora obiekt.

Dodatkowo kamery panoramy oraz kamery wspomagające mają możliwość obrotu w dwóch osiach, co pozwala im realizować dodatkowe funkcje. W obu przypadkach możliwa jest obserwacja otoczenia pojazdu podczas manewrowania oraz zakłada się, że boczne kamery będą realizowały funkcję lusterek wstecznych, poprzez przesyłanie operatorowi informacji wizualnej o obiektach znajdujących się z tyłu pojazdu.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kelly A.: An intelligent, predictive control approach to high-speed cross-country autonomous navigation problem, Pittsburg, The robotics institute Carnegie Mellon University, 1995.
- [2] Typiak A.: Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej „Dobór parametrów, badanie modelowe i laboratoryjne systemów wizyjnych dla zdalnie sterowanych pojazdów torujących”, WAT, Warszawa, 2002.
- [3] Praca zbiorowa: Sprawozdanie z realizacji projektu “Dobór systemu rozpoznania otoczenia dla bezzałogowych maszyn i pojazdów wojskowych”, WAT, Warszawa, 2007.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008/2011, jako projekt rozwojowy Nr: OR 00 0012 06