

Adam BARTNICKI¹
Stanisław KONOPKA¹
Rafał TYPIAK¹

OPRACOWANIE SYSTEMU WIZYJNEGO DLA SZYBKOBIEŻNEJ BEZZAŁOGOWEJ MASZYNY INŻYNIERYJNEJ

W referacie przedstawiono proces doboru komponentów systemu wizyjnego dla szybkobieżnych bezzałogowych maszyn inżynieryjnych. Zaprezentowano także wyniki testów różnych konfiguracji systemów, przeprowadzonych w Wojskowej Akademii Technicznej na wytypowanych pojazdach terenowych. Analiza ta przeprowadzona została na potrzeby, powstającego w Katedrze Budowy Maszyn Wojskowej Akademii Technicznej, inżynieryjnego robota wsparcia.

DEVELOPING A VISION SYSTEM FOR A FAST MOVING ENGINEERING MACHINE

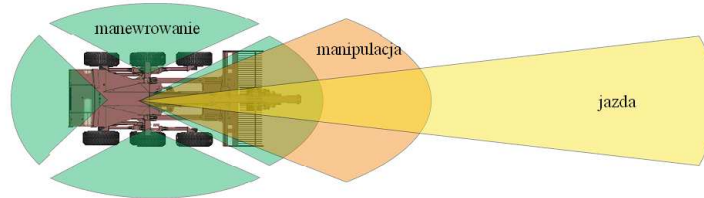
Unmanned engineering machines has come a long way from designer's visions to tests of introducing them to public use. This paper presents guidelines for choosing components for an unmanned engineering machines. It also presents a short summary of tests which have been carried out in Military University of Technology on different off-road vehicles. All of which were carried out to benefit the Support Engineering Robot which is being constructed in the Machine Building Faculty 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):

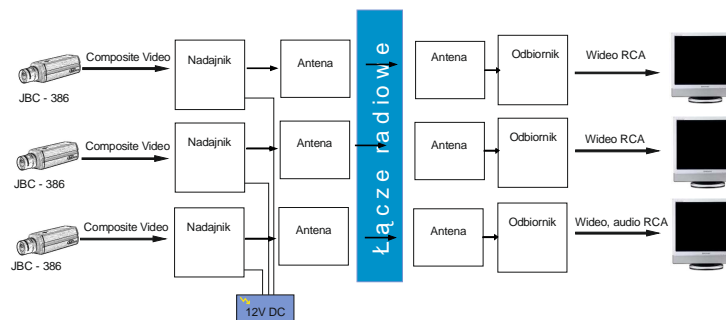
- dostarczania informacji dotyczących trasy przejazdu;
- obserwacji osprzętu roboczego i miejsca prac inżynieryjnych;
- obserwacji terenu wokół pojazdu podczas manewrowania.

¹ Wojskowa Akademia Techniczna



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

System wizyjny szybkobieżnej maszyny bezałogowej (rys. 2) powinien być tak skonfigurowany, aby zapewnić operatorowi osiągnięcie funkcjonalności w sterowaniu pojazdem na poziomie takim jak w przypadku sterowania bezpośrednio na pojeździe. 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.



Rys.2. Schemat ideowy systemu wizyjnego składającego się z trzech kamer wideo

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 zerwania 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, które muszą poruszać się ze znacznie większymi prędkościami, takie rozwiązanie

ostatecznie doprowadzi 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 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. DOBÓR ELEMENTÓW SYSTEMU WIZYJNEGO POD WZGLĘDEM JAKOŚCI WIZUALIZACJI OTOCZENIA

Jakość HD dla sygnału wideo (tzn. obraz w wysokiej rozdzielczości - przynajmniej 720 linii poziomych na klatkę) powoli staje się standardem w życiu codziennym. Trend ten widoczny jest też w systemach nadzoru obiektów, a nawet w systemach transmisji bezprzewodowej wideo wewnątrz pomieszczeń, np. przesyłanie obrazu telewizyjnego bezprzewodowo pomiędzy pomieszczeniami wewnątrz budynku. Jednakże to rozwiązanie ma ograniczone możliwości wykorzystania w przypadku maszyn inżynierskich. O ile bardzo dobra jakość obrazu przesyłanego do operatora może znacznie poprawić efektywność pracy, rozwiązanie to obarczone jest poważnymi ograniczeniami. Po pierwsze przesyłanie tak dużej ilości danych wymaga zastosowania wysokich częstotliwości. Dla wideo w jakości HD jest to poziom ~2,4GHz, oraz ~5,6GHz [3]. Jednakże przestrzeń w tym paśmie nie jest regulowana prawnie, przez co możliwość wystąpienia zakłóceń przy większych odległościach pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem jest znaczna. Co prawda obecnie najczęściej wykorzystywaną częstotliwością jest 2,4GHz, lecz już teraz widoczna jest szybka zmiana na wyższe pasmo. Dodatkowymi zabiegami pozwalającymi na przesłanie większej ilości danych jest zwiększenie szerokości kanału radiowego. Należy jednak pamiętać, że oba te zabiegi powodują, że pasmo transmisyjne staje się dużo bardziej podatne na zakłócenia i trudniej jest utrzymać bezbłędną transmisję. Przy tak wysokich częstotliwościach, zakłócenia wprowadza nawet wilgoć zgromadzona na liściach drzew, a utrzymanie stabilnego połączenia dla poruszającego się jednego z elementów łączy (przeważnie nadajnika) jest niezmiernie trudne.

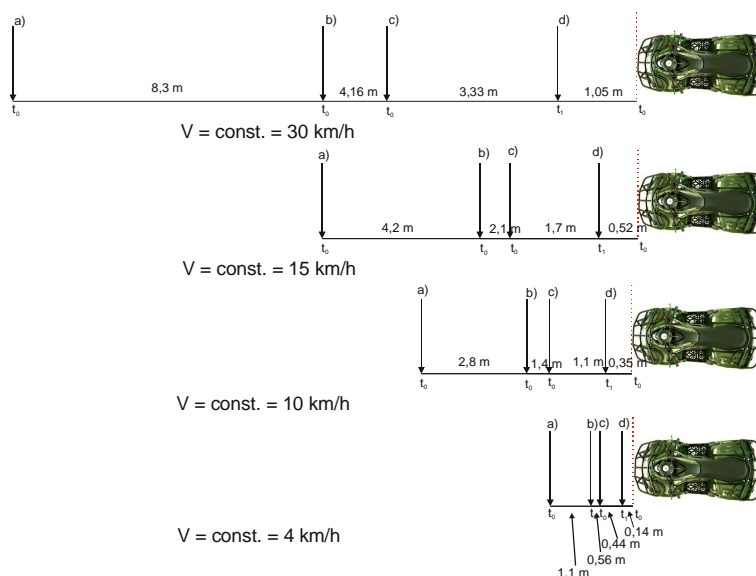
Oznacza to, że chcąc obecnie korzystać z obrazu wideo w jakości HD w zastosowaniach mobilnych, ograniczamy zasięg pracy do ok. 200 m (ok. 40 m, gdy korzystamy z rozwiązań ogólnodostępnych) i prędkości poruszania się do <10 km/h.

Znacznie lepiej pod względem parametrów mobilności wypadają transmitters obrazu SD (tzn. obraz standardowej rozdzielczości – mniej niż 720 linii poziomych na klatkę), które kompresują obraz do formatu MPEG2. Posiadają one nie tylko większą odporność na zakłócenia, lecz mogą wykorzystywać niższe częstotliwości, które zawarte są w pasmach zastrzeżonych. W takich sytuacjach (posiadając zgodę Biura Zarządzania Częstotliwościami), można korzystać z teoretycznie „czystego” pasma. Format kompresji MPEG2 jest to grupa standardów stratnej kompresji obrazu i dźwięku. Jest on powszechnie stosowany na świecie jako format telewizji cyfrowej.

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. Wynika to z faktu, że w tym czasie obraz przechodzi przez wiele stadiów przetwarzania: 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.

Opóźnienia wywołane przesyłaniem sygnału cyfrowego drogą radiową mają ogromny wpływ na możliwości robocze szybkobieżnej maszyny inżynierskiej. Efekty tego zjawiska obrazuje rysunek 3, na którym przedstawiono drogę jaką przebywa pojazd w czasie opóźnienia wywołanego przez proces transmisji obrazu, dla pojazdu poruszającego się ze stałą prędkością. Dla pojazdów inżynierskich, prędkość 30 km/h jest to akceptowalna prędkość poruszania się.



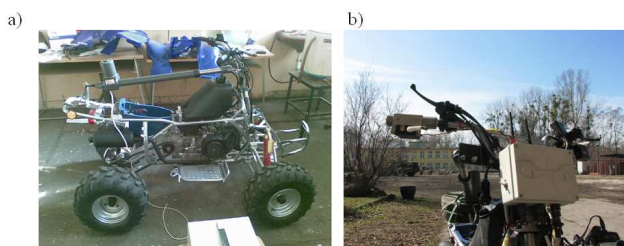
Rys.3. Odległość przebyta przez pojazd bezzatłogowy w czasie wyświetlenia operatorowi obrazu z chwili czasowej t_0 dla systemów wizyjnych z opóźnieniem: a) 1s; b) 0,5 s; c) 0,4 s; d) 0,126 s

Analizując przedstawione dane (rys. 3) 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 jego 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 inżynierskich poruszających się z prędkości 30km/h wynosi około 9 m, powoduje to wydłużenie

efektywnej drogi hamowania prawie o połowę. Trzeci rodzaj łączy 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 łączy analogowych, które posiadają najmniejsze opóźnienia. Zamontowane one były na pojeździe quad Raptor 150 (rys. 4).



Rys.4. *Quad Raptor 150: a) widok zamontowanego układu skrętu 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 jest bardzo słaba przy prędkościach powyżej 15km/h (rys. 5).



Rys.5. *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 o 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. 6). Niestety, w tej konfiguracji, sterowanie pojazdem z prędkościami przekraczającymi 10 km/h było bardzo utrudnione.



Rys.6. Pojazd Lewiatan 3 z zamontowanym łączem Ethernetowym i kamerami pomiędzy reflektorami oraz z głowicą obserwacyjną

Analizując parametry łącza radiowego, należy uwzględnić jego zasięg nie tylko w odniesieniu do odległości operatora od maszyny, lecz także do prędkości z jakimi porusza się maszyna. Jazda się z prędkością rzędu 15-20 km/h lub większą w sytuacji gdy maszyna znajduje się na granicy zasięgu spowoduje utratę sygnału wideo [2]. Należy zawsze pamiętać o zachowaniu bezpiecznego marginesu odległości, gdyż utrzymanie stabilnego połączenia pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem na granicy maksymalnego zasięgu pracy może być niemożliwe nawet w przypadku, gdy obie jednostki są stacjonarne. Wynikać to może z czynników środowiskowych: czy pomiędzy antenami nie znajdują się żadne obiekty (czy anteny „się widzą”), jaka jest wilgotność powietrza, czy w pobliżu nie znajdują się obiekty, które mogą zakłócać/pogarszać jakość sygnału? W przypadku cyfrowej transmisji sygnału wideo drogą radiową może się okazać, że obecność budynków w okolicy może poprawić jakość sygnału. Wynika to z faktu, że fale te są generowane z wykorzystaniem innego rodzaju modulacji.

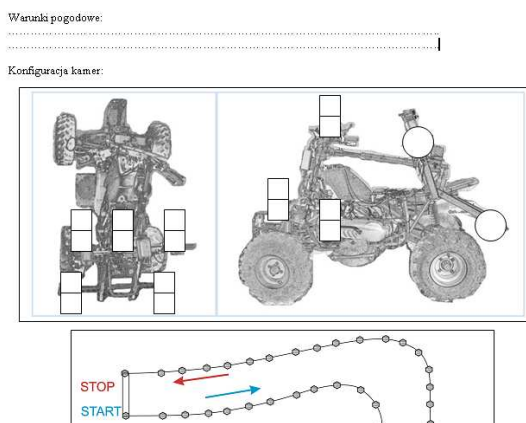
3. DOBÓR ELEMENTÓW SYSTEMU WIZYJNEGO POD WZGLĘDEM SPOSOBU WIZUALIZACJI OTOCZENIA

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 sterowanym zdalnie. Testy przeprowadzono na pojeździe quad Raptor 150 z wykorzystaniem następujących rodzajów kamer:

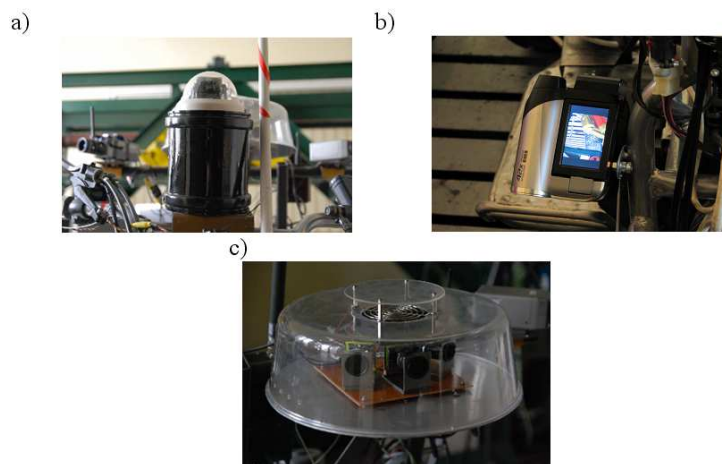
1. Ręczne kamery typu 'handheld' firmy Panasonic z układem stabilizacji obrazu;
2. Czarnobiałe kamery CCD
3. Kolorowe kamery CCD z matrycą 1/4";
4. Kolorowe kamery CCD z matrycą 1/3".

Testy przewidywały różnorodne ustawienia kamer, zarówno pojedynczo w wytypowanych miejscach pojazdu (rys. 7), jak i tworzących panoramę, oraz wykorzystywano zaprojektowaną głowicę obrotową (rys.8).



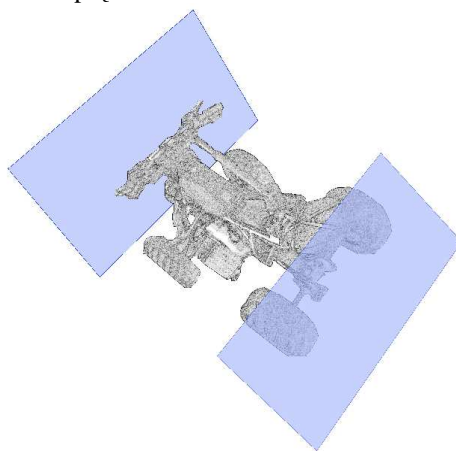
Rys.7. Wycinek z ankiety dotyczącej jakości zdalnego sterowania pojazdem przy dużych prędkościach i podczas manewrowania

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 teren 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.



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

Sprawdzane ustawienia miały na celu określenie jakie elementy środowiska i pojazdu muszą być widoczne w płaszczyznach przed i za pojazdem (rys. 9) aby móc pewnie sterować nim w zakresach prędkości od 0 do 30 km/h.

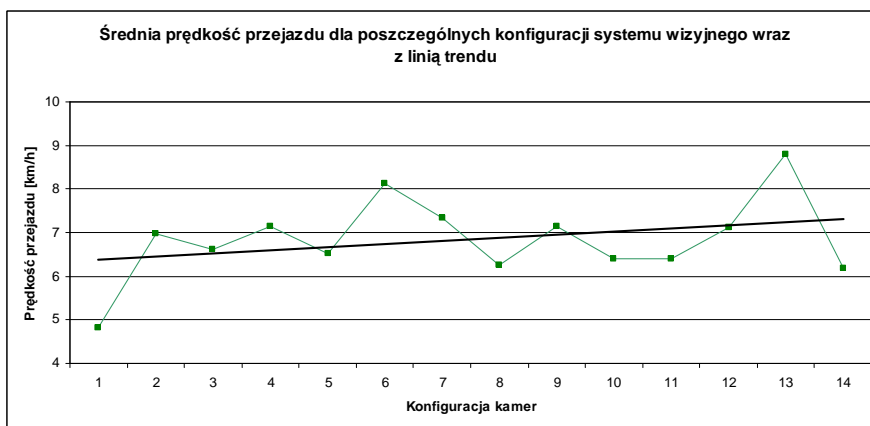


Rys.9. Płaszczyzny obserwowane w testach teleoperacji

W czasie 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.

Rysunek 10 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).



Rys.10. Wykres średnich prędkości przejazdu toru testowego w zależności od konfiguracji kamer systemu wizyjnego

5. 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 obecny 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.11. 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. 11) 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.

4. 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 **2008-2010** jako projekt rozwojowy Nr OR 00 0012 06