

SZPYTKO Janusz¹
HYLA Paweł²

Miary podobieństwa w wyznaczaniu dysparycji obrazu stereowizyjnego

stereowizja,
dysparycja,
miary podobieństwa

Streszczenie

Przedmiot artykułu stanowi test ośmiu metod obliczania miary podobieństwa zaimplementowanych w postaci algorytmu porównującego blokami dla potrzeb obliczania mapy dysparycji ze wzorcowej stereopary. Przyjęte przez autorów kryteria oceny uzyskanych wyników pod względem ich przydatności w głównej mierze uwzględniają zarówno kryteria jakościowe wygenerowanej mapy dysparycji oraz kryteria ilościowe uwzględniające czas przetwarzania przyjętej za wzorzec stereopary.

THE SIMILARITY MEASURES IN DYSPARITY CALCULATION IN THE THREE-DIMENSIONAL SCENE RECONSTRUCTION

Abstract

The article focus on the eight methods of the similarity measures, implementing in the region matching algorithms for the needs of disparity calculation. The authors establishes quality and quantitative criteria for the final results examine. Each posses dense disparity map was tested under her outward appearance and computing time. All tests was realized on the example stereo pair photos.

1. WSTĘP

Proces wytwarzania przez człowieka narzędzi i maszyn ewoluował od konstrukcji ułatwiających codzienną pracę poprzez maszyny które w coraz wyraźniejszy sposób zastępowały działania człowieka, realizując jego codzienną pracę w sposób całkowicie autonomiczny. W czasach współczesnych, rola operatora maszyny z osoby bezpośrednio nadzorującej pracę została przesunięta do pozycji nadzorca systemu odpowiedzialnego za wprowadzanie warunków początkowych związanych z czasem działania urządzenia oraz warunków brzegowych bezpośrednio związanych z uwarunkowaniami otoczenia i charakterem pracy. Autonomiczność współczesnych maszyn i urządzeń wymusza konieczność implementacji mechanizmów pozwalających nie tylko na pozyskanie informacji o aktualnym położeniu [18, 19] urządzenia ale także dodatkowych informacji związanych z możliwością identyfikacji otoczenia w którym się ono znajduje.

Poza zadaniami wysoce specjalizowanymi, obszar działania samodzielnie poruszających się maszyn jest ściśle związany ze środowiskiem w jakim wykształcił się ludzki narząd wzroku. Tak więc implementacja binokularnego (stereoskopowego) systemu widzenia dla potrzeb autonomicznie przemieszczających się urządzeń, wzorowana na wykształconym w procesie ewolucji organizmów żywych (w tym i człowieka) systemie optycznej oceny perspektywy typu (ang. *Human Binocular Vision*) jest naturalna z punktu widzenia człowieka [18, 20]. Umożliwienie maszynom samodzielnej oceny otoczenia na drodze informacji pozyskiwanej z metod wizyjnych, umożliwi wyższy stopień interakcji pomiędzy operatorem, a urządzeniem [17] poprzez działanie na jednej płaszczyźnie między posiadającym wzrok człowiekiem, a „widzącą” maszyn [12, 22].

Moc obliczeniowa współczesnych komputerów oraz cyfrowych układów przetwarzających [6, 10] wzrosła niemalże w tempie wykładniczym w porównaniu do komputerów z pierwszej połowy lat dziewięćdziesiątych poprzedniego wieku. Choć efektywna nawigacja, realizowana w czasie rzeczywistym na podstawie cyfrowego przetwarzania obrazów do tej pory nie została w pełni zrealizowana [2, 14] to i tak współczesne komputery umożliwiają implementacje algorytmów do rozwiązywania problematyki z zakresu pozyskiwania informacji o świecie zewnętrznym [4, 9, 16].

Przedmiot artykułu stanowi test metod i algorytmów realizujących ocenę miary podobieństwa [7, 13, 15, 21] dla potrzeb estymowania dysparycji metodą porównywania blokami (ang. *regions matching*). W artykule dokonano oceny przydatności algorytmów obliczających dysparycję mając na uwadze czas realizacji obliczeń oraz wizualny efekt końcowy pozyskanej mapy dysparycji [11, 23]. Testy przeprowadzono pod kątem możliwości zastosowania stereowizji w identyfikacji przestrzeni roboczej zautomatyzowanych systemów transportowych charakteryzujących się wysoką autonomicznością funkcjonowania.

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; 30-059 Kraków; al. A. Mickiewicza 30, Tel: +48 12 617-31-03, Fax: +48 12 617-35-31, e-mail: szpytko@agh.edu.pl

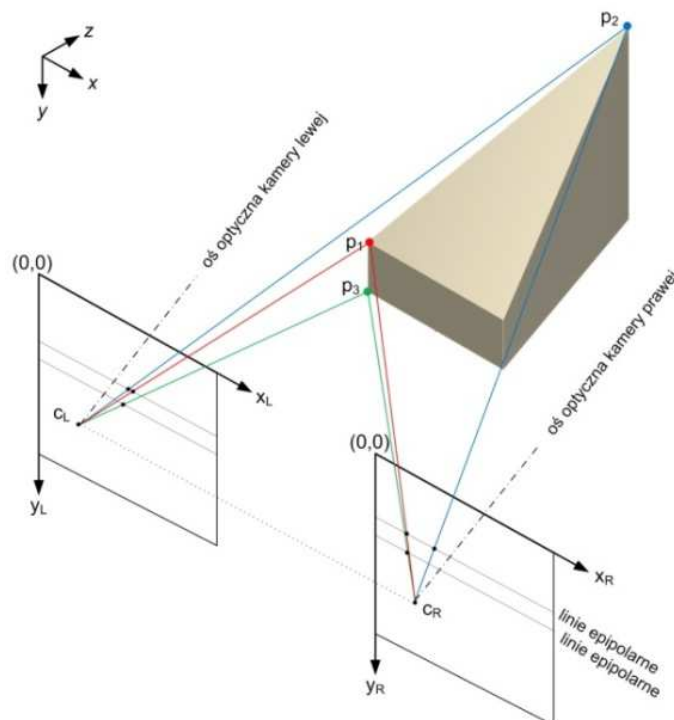
² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; 30-059 Kraków; al. A. Mickiewicza 30, Tel: +48 12 617-31-04, e-mail: hyla@agh.edu.pl

2. DYSPARYCJA W REKONSTRUKCJI SCENY TRÓJWYMIAROWEJ

Reprezentacja obrazowa sceny trójwymiarowej niezależnie od zastosowanej metody oraz użytego sprzętu jest tylko i wyłącznie obrazem uzyskanym w wyniku rzutowania trójwymiarowej przestrzeni na ograniczoną powierzchnię (determinowaną wymiarami przetwornika światłoczułego tzw. matrycy). Parametry opisywanego przekształcenia geometrycznego są zależne przede wszystkim od parametrów wewnętrznych (ang. *intrinsic parameters*) układu optycznego urządzenie przechwytyjącego obraz. Obraz końcowy zależy przede wszystkim od dwóch parametrów: skali oraz perspektywy. Projektacja tego samego obiektu znajdującego się w danej odległości od urządzenia rejestrującego obraz zależy także od wartości ogniskowej układu optycznego. Tak więc w przedstawionej transformacji kluczowe jest pozyskanie danych związanych z parametrami przekształcenia układu optycznego poprzez jego kalibrację, czyli tzw. wzorcowanie. Kalibracja najczęściej polega na fotografowaniu wzorca o ściśle zdefiniowanych wymiarach [5, 18, 19]. W ten sposób po pewnych obliczeniach pozyskuje się informacje o rzeczywistej wartości ogniskowej układu optycznego oraz generowanych zniekształceniach (dystorsja styczna oraz radialna). Poprzez dane pozyskane w procesie kalibracji w warunkach rzeczywistego odwzorowania jest możliwe także wyznaczanie odległości od płaszczyzny obrazowej związanej z urządzeniem rejestrującym, a płaszczyzną przedmiotową związaną z odwzorowywanym obiektem. Szczególnym przypadkiem uwzględniającym kalibrację jest analiza obrazu pozyskanego z dwóch kamer, których osie optyczne zostały przesunięte względem siebie o ściśle określoną wartość. W opisywanym przypadku dodatkowy parametr kalibracyjny stanowi odległość pomiędzy osiami optycznymi urządzeń rejestrujących obraz [14, 15], umożliwiającą pomiar efektu tzw. dysparycji [4, 10, 11, 23], czyli stopnia niezgodności położenia korespondujących sobie punktów prawego oraz lewego obrazu, wchodzącego w skład pary stereo [8].

2.1 Rekonstrukcja stereowizyjna

W celu uzyskania wzajemnie jednoznacznego odwzorowania punktu w przestrzeni trójwymiarowej konieczna jest informacja o rzucie punktu na więcej niż jeden obraz. Na rys. 1. przedstawiono trzy punkty: P_1, P_2, P_3 reprezentujące wierzchołki odwzorowanej bryły w systemie stereoskopowym poprzez punkty p_{1L}, p_{2L}, p_{3L} w lewym urządzeniu rejestrującym oraz punkty p_{1R}, p_{2R}, p_{3R} w prawym. W układzie kanonicznym odpowiadające sobie punkty w prawej i lewej płaszczyźnie obrazowej są połączone tzw. liniami epipolarnymi [14, 15].

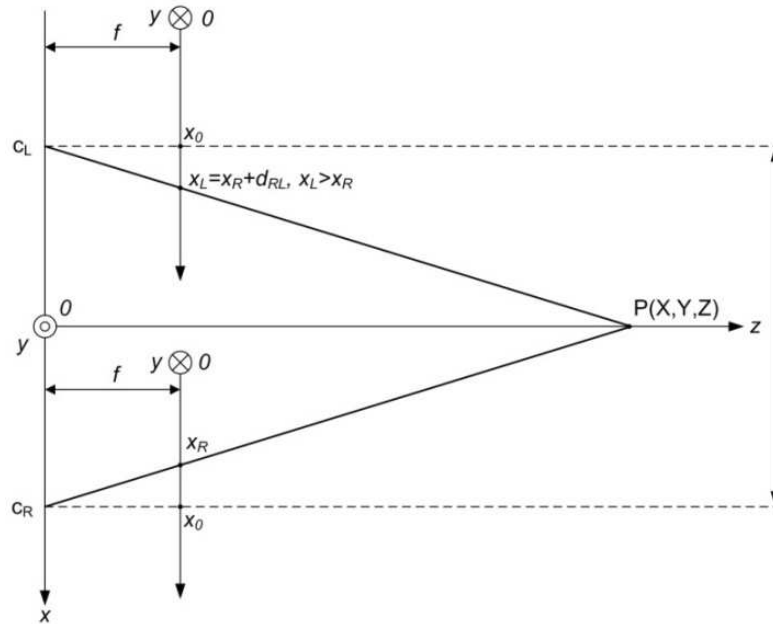


Rys. 1. Układ kanoniczny w odwzorowaniu stereoskopowym

Linia epipolarna dla danego punktu w obrazie prawym, bądź lewym jest linią będącą obrazem prostej wychodzącej z ogniska c_L/c_P i przechodzącej przez odpowiednie punkty p_R/p_L . W szczególnym przypadku usytuowania urządzeń rejestrujących, jest przypadkiem układu kanonicznego, w którym wszystkie linie epipolarnie są równoległe do osi x przechodzącej przez obydwa rejestrowane obrazy. W specyficznych układach w których osie optyczne urządzeń rejestrujących nie są wzajemnie równoległe, linie epipolarnie nie są wzajemnie do siebie równoległe i przecinają się w jednym punkcie zwanym punktem epipolarnym.

Główny problem rekonstrukcji obrazu 3D na podstawie obrazów stereowizyjnych jest rozwiązanie problemu odpowiedniości (ang. *correspondence problem*). W układzie kanonicznym problem ten ulega uproszczeniu, gdyż

współrzędne y obrazów dowolnego punktu przestrzeni są sobie równe, tj. $y_L = y_R$. Zatem zadanie poszukiwania punktu p_L odpowiadającego punktowi p_R można ograniczyć jedynie do linii położonej wzdłuż jednego wiersza o znanej współrzędnej. Rozwiązaniem problemu odpowiedności jest wyznaczenie tzw. obrazu dysparycji stanowiącego różnicę współrzędnych związanych z wzajemnym przesunięciem obrazów każdego punktu przestrzeni (x,y,z) w obu urządzeniach rejestrujących [14, 15].



Rys. 2. Schemat obliczania dysparycji

Tak więc jeżeli danemu punktowi p_R z obrazu odniesienia o współrzędnych (x_R, y_R) odpowiada punkt p_L z drugiego obrazu o współrzędnych (x_L, y_L) gdzie $y_R = y_L$, to przesunięcie (dysparycja) między prawym, a lewym punktem jest równe zależności (1.1)

$$d_{RL} = x_L - x_R, \quad (1.1)$$

Dodatkowo, pomiędzy parą punktów p_L, p_R i punktem $P(x,y,z)$ przestrzeni można wyznaczyć współrzędne $P(x,y,z)$, rejestrowane w obrazach obu kamer dla układu kanonicznego z wykorzystaniem zależności (1.2):

$$x = \frac{B(x_R + x_L - 2x_0)}{2d_{RL}}, \quad (1.2)$$

$$y = \frac{B \cdot y_p}{d_{RL}}, \quad (1.3)$$

$$z = \frac{B \cdot f_p}{d_{RL}}, \quad (1.4)$$

gdzie:

- B – odległość między osiami optycznymi kamer,
- y – $y_R = y_L$,
- d_{RL} – dysparycja dana wzorem (1.1),
- f_p – ogniskowa kamery wyrażona w pikselach,
- x_0 – współrzędna środka obrazu, przez którą przechodzi oś kamery.

Z zależności (1.2) wynika, że dysparycja stanowi kluczowy parametr [14, 15] w rekonstrukcji sceny widzenia trójwymiarowego. Znając przesunięcie obrazów punktu przestrzeni na obydwóch rejestrowanych obrazach, przy znanych ogniskowych oraz bazie układu stereowizyjnego, można wyznaczyć tzw. głębię punktu. Dysponując komputerem o odpowiedniej mocy obliczeniowej, można obliczyć dysparycję dla każdego punktu obrazu i otrzymać tzw. gęstą mapę dysparycji (ang. *dense disparity map*), która stanowi mapę paralaks podłużnych odwzorowujących perspektywę.

3. METODY OBLICZANIA DYSPARYCJI

Pozyskanie rzetelnej mapy dysparycji [4, 6, 10, 23] obrazującej dystans jaki dzieli płaszczyznę obrazową i płaszczyznę przedmiotową ma szczególne znaczenie w aplikacjach dedykowanych dla potrzeb systemów działających autonomicznie, umożliwiając budowę cyfrowej mapy otoczenia. Stereowizja nie jest jedyną metodą umożliwiającą pozyskanie tego typu informacji na temat otoczenia ale jednak ze względu na możliwość zastosowania coraz to bardziej wydajnych jednostek obliczeniowych jest możliwe implementowanie algorytmów obliczania dysparycji, których zapotrzebowanie na moc obliczeniową maszyny cyfrowej jest bardzo wysokie ale przynosi bardzo wymierne korzyści.

W celu oceny przydatności metod/ algorytmów obliczania dysparycji w poniższym rozdziale, przedstawiono poszczególne metody tzw. miar podobieństwa używanych m.in. przy badaniu stopnia skorelowania wyróżnionych obszarów (regionów) z par stereo. Kluczem oceny przydatności algorytmu użytego to obliczania dysparycji, stanowi wyważenie rzetelności odwzorowania w funkcji zapotrzebowania na moc obliczeniową, a tym sam czas realizowania obliczeń.

3.1 Warunki wstępne

W podrozdziale przedstawiono algorytmy wyznaczające mapę dysparycji na podstawie współczynnika korelacji powstałego w wyniku porównywania poszczególnych bloków (regionów) zrektyfikowanej pary zdjęć stereowizyjnej. W przyjętym układzie lewego oraz prawego zdjęcia stereo pary można wyróżnić tablicę **A** oraz tablicę **B**, gdzie **A** jest tablicą (obrazem) referencyjnym, natomiast na obrazie **B** poszukuje się takich punktów, bądź regionów które korespondują z punktami bądź określonym regionom na obrazie **A**, cały czas mając na uwadze przesunięcie osi optycznej urządzeń rejestrujących obraz. W procesie wyznaczania mapy dysparycji, zdjęcie cyfrowe jest przekształcone do tablicy liczb, która można wyróżnić kolumny oraz wiersze bezpośrednio odpowiadające szerokości oraz wysokości (rozdzielczość) rejestrowanego zdjęcia przedstawionego w pikselach. Tak więc każdy piksel ma swój unikatowy adres (m,n) , któremu dodatkowo przypisuje się wektor odpowiadający intensywności barw w układzie $I(m,n)=(R,G,B)$, wyrażony w składowych wartości progu dla koloru czerwonego, zielonego oraz niebieskiego z przedziału $I(m,n)=(0-255,0-255,0-255)$. Tak więc, jeżeli mamy poszczególny punkt na obrazie **A**, opisany współrzędnymi (m,n) , dla tego punktu poszukujemy skorelowanego punktu spośród całego zbioru punktów zawartych w macierzy **B**, przypisując mu po skorelowaniu adres typu $(m,n)=(0,0)$. W powyższej transformacji, układ współrzędnych można wyrazić przy pomocy odpowiadającej sobie parze indeksów (x,y) dla punktów z referencyjnego obrazu **A**, oraz (μ,ν) dla punktów skorelowanych w obrazie **B**. Uwzględniając dodatkowo informacje odnośnie intensywności barw poszczególnych punktów na obrazie **A** oraz **B** poprzez wartość $R(x,y)$ rozumianą jako intensywność punktu I wyrażonego we współrzędnych (x,y) na macierzy referencyjnej **A** oraz wartość $S(\mu,\nu)$ wyobrażającą intensywność skorelowanego punktu I wyrażonego we współrzędnych (μ,ν) znajdującego się na macierzy **B**.

3.2 Cyfrowa korelacja obrazów

W terminologii „cyfrową korelację obrazów” można rozumieć jako „znajdowanie odpowiednika” lub „rozpoznawanie cechy podobnej” (ang. *Digital Image Matching*). W praktyce oznacza to jednak automatyczne odnajdowanie ściśle zdefiniowanego odpowiednika na innym obrazie cyfrowym. Metody *DIM* sprowadzają się głównie do czterech podstawowych etapów:

1. Zdefiniowania elementów dopasowania (punkt, linia bądź region),
2. Znalezienia odpowiedników zdefiniowanych elementów na drugim obrazie (w przypadku stereopary),
3. Obliczenia położenia przestrzennego dopasowywanych elementów względem obrazu referencyjnego (dysparycja),
4. Oszacowania dokładności dopasowania.

Algorytmy wyznaczające współczynnik korelacji poprzez porównywanie bloków (regionów) zawierających po kilkanaście lub kilkadziesiąt punktów muszą dodatkowo uwzględniać konieczność zdefiniowania wymiarów regionu służącego do porównań. W artykule wymiary mini macierzy determinującej obszar poszukiwań wyrażono poprzez stałą **U** z indeksem x dla szerokości przyszłego regionu oraz stałą **V** z indeksem y dla określenia jego wysokości. Poniżej przedstawiono ogólnie sformalizowane zależności matematyczne wraz z ich anglojęzycznymi rozwinięciami przedstawiające wybrane miary podobieństwa [1]:

- LSAD - *Locally scaled Sum of Absolute Differences* (1.5),
- LSSD - *Locally scaled Sum of Squared Differences* (1.6),
- NCC - *Normalized Cross-Correlation* (1.7),
- SAD - *Sum of Absolute Differences* (1.8),
- SSD - *Sum of Squared Differences* (1.9),
- ZNCC - *Zero mean Normalized Cross-Correlation* (1.10),
- ZSAD - *Zero mean Sum of Absolute Differences* (1.11),
- ZSSD - *Zero mean Sum of Squared Differences* (1.12).

$$LSAD(\mu, \nu) = \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U \left| R(x, y) - \frac{\bar{R}(x, y)}{\bar{S}(\mu + x, \nu + y)} S(\mu + x, \nu + y) \right|^2, \quad (1.5)$$

$$LSSD(\mu, \nu) = \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U \left(R(\mu, \nu) - \frac{\bar{R}}{\bar{S}(\mu, \nu)} S(\mu + x, \nu + y) \right)^2, \quad (1.6)$$

$$NCC(\mu, \nu) = \frac{\sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U R(x, y) S(\mu + x, \nu + y)}{\sqrt{\sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U R^2(x, y) \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U S^2(\mu + x, \nu + y)}}, \quad (1.7)$$

$$SAD(\mu, \nu) = \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U |R(x, y) - S(\mu + x, \nu + y)|, \quad (1.8)$$

$$SSD(\mu, \nu) = \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U (R(x, y) - S(\mu + x, \nu + y))^2, \quad (1.9)$$

$$ZNCC(\mu, \nu) = \frac{\sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U (R(x, y) - \bar{R}) \cdot (S(\mu + x, \nu + y) - \bar{S}(\mu, \nu))}{\sqrt{\sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U (R(x, y) - \bar{R})^2 \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U (S(\mu + x, \nu + y) - \bar{S}(\mu, \nu))^2}}, \quad (1.10)$$

$$ZSAD(\mu, \nu) = \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U |(R(x, y) - \bar{R}) - (S(\mu + x, \nu + y) - \bar{S}(\mu, \nu))|, \quad (1.11)$$

$$ZSSD(\mu, \nu) = \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U ((R(x, y) - \bar{R}) - (S(\mu + x, \nu + y) - \bar{S}(\mu, \nu)))^2, \quad (1.12)$$

gdzie:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U R(x, y)$$

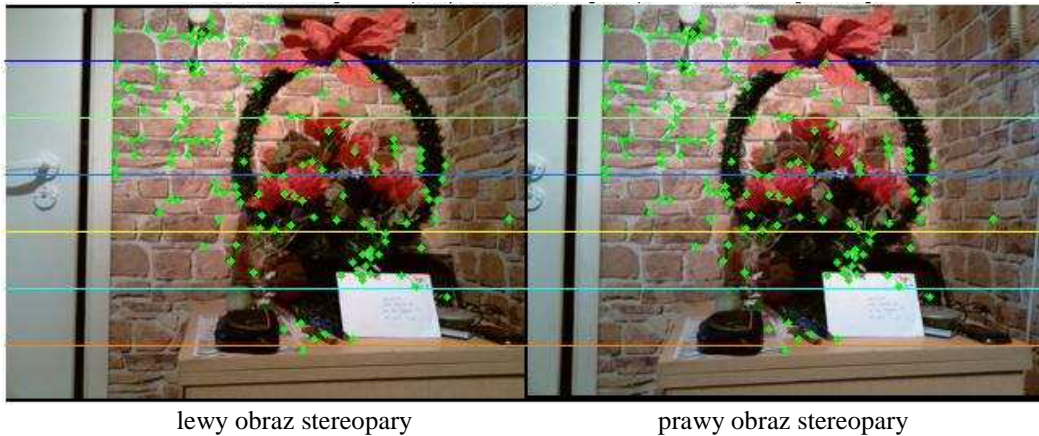
$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{y=-V}^V \sum_{x=-U}^U S(\mu + x, \nu + y)$$

$N = (2V + 1) \cdot (2U + 1)$ - ilość pikseli w regionie

4. ALGORYTMY OBLICZANIA DYSPARYCJI

4.1 Testy ilościowe

Przedstawione zależności (1.5-1.12) zaimplementowano [1, 3] w postaci m-plików skryptowych w środowisko Matlab w wersji 7.10.0.499 (R2011a). Wszystkie testy zostały przeprowadzone na wcześniej przygotowanej, poddanej procedurze rektyfikacji (rys. 3), parze zdjęć stereowizyjnych o pierwotnej rozdzielczości 320x240 punktów.

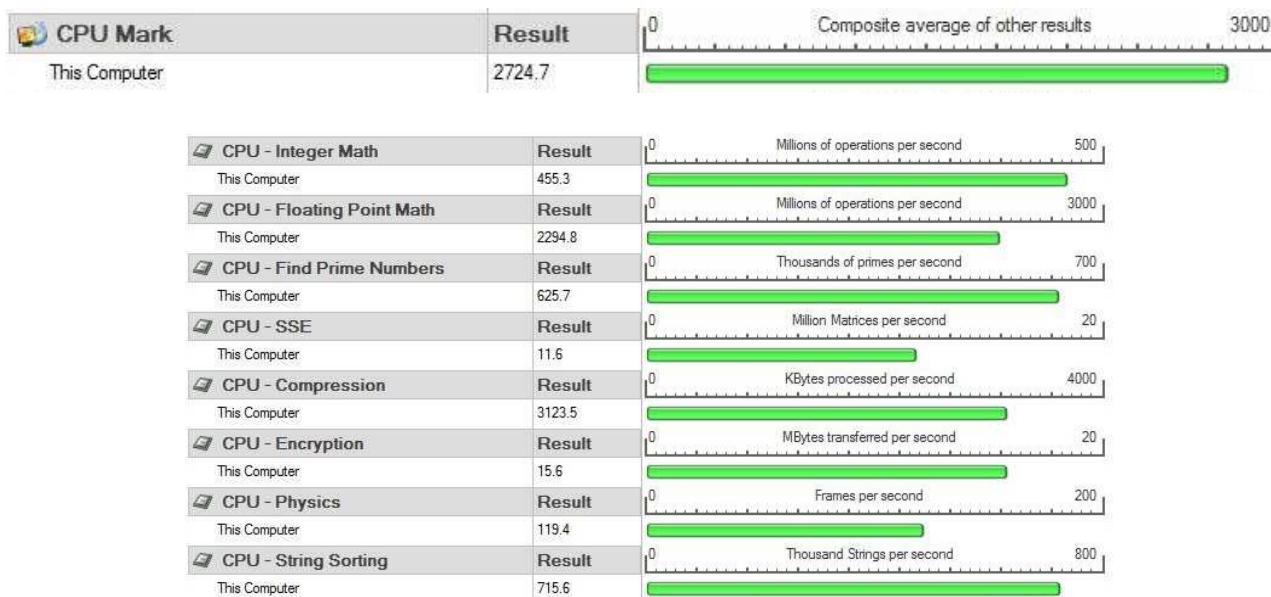


lewy obraz stereopary

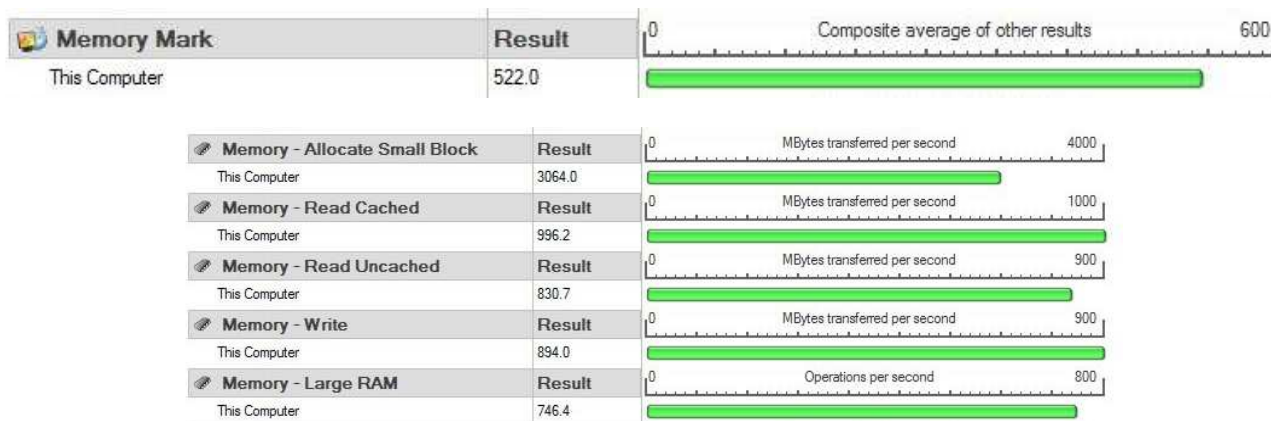
prawy obraz stereopary

Rys.3. Testowa stereopara z wzajemnie odpowiadającymi liniami epipolarnymi (rektyfikacja)

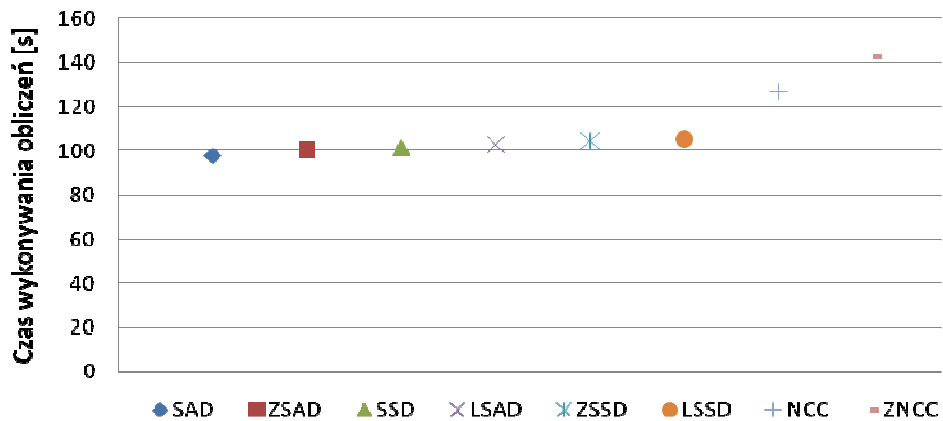
Do testów użyto stacji roboczej działającej pod kontrolą systemu operacyjnego Windows 7 Professional SP1 64-bit, osiągającą 960.3 punktów w benchmarku programem PerformanceTest 7 x64 (wersja testowa). Wyniki kluczowych poszczególnych podzespołów, bezpośrednio wpływających na czas obliczeń zestawiono osobno, na rys. 4 przedstawiono zestawienie końcowe oraz wyniki poszczególnych testów wchodzących w skład procedury testowania jednostki obliczeniowej CPU (ang. *Central Processor Unit*), natomiast na rys. 5 przedstawiono zestawienie testów wraz z otrzymanymi wynikami dla pamięci RAM (ang. *Random Access Memory*). Końcowe zestawienie czasu obliczania dysparycji obrazów testowych poszczególnymi metodami przedstawiono na rys. 6.



Rys. 4. Test centralnej jednostki obliczeniowej (CPU test)



Rys. 5. Test pamięci operacyjnej RAM (memory test)



Rys. 6. Zestawienie czasu wykonywania obliczeń dla poszczególnych algorytmów

Najmniej wymagającym pod względem zapotrzebowania na moc obliczeniową komputera okazał się algorytm implementujący miarę SAD. Czas obliczania dysparycji metodami innymi metodami takimi jak: ZSAD, SSD, LSAD, ZSSD oraz LSSD mieścił się w tej samej klasie zapotrzebowania na moc obliczeniową i wahał się w przedziale t (czas dla miary SAD) plus trzy do dziesięciu dodatkowych sekund. Wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową wyraźnie wzrósł w przypadku zastosowania metod NCC oraz ZNCC, które wymagały średnio 30% oraz 46% więcej czasu na przeprowadzenie obliczeń w porównaniu z metodą SAD. Z tego też powodu miara podobieństwa SAD (suma bezwzględnych wartości różnic) jest często spotykana w publikacjach traktujących o problematyce wyznaczania dysparycji [14, 15].

Należy podkreślić iż wnioski z przeprowadzonych powyżej testów odnoszą się tylko i wyłącznie do czasu trwania obliczeń i nie uwzględniają jakości odwzorowania, co w przypadku obliczania dysparycji stanowi bardzo istotny parametr.

4.2 Testy jakościowe

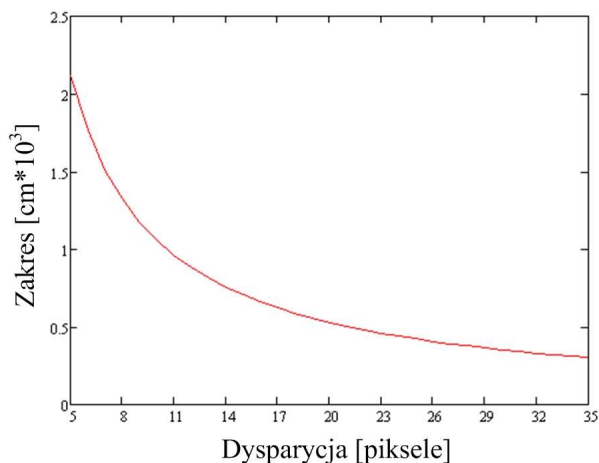
W ramach testów jakościowych wygenerowano mapy dysparycji przy użyciu opisanych metod (zależności od 1.5 do 1.12). Mapy dysparycji przedstawiono na rys. 8-15, wszystkie mapy wyskalowano w ten sam sposób, im cieplejszy kolor tym odwzorowany przedmiot znajduje się bliżej płaszczyzny obrazowej urządzenie rejestrującego obraz. Wartości przedziału przesunięcia (dysparycji) dla odwzorowania sceny trójwymiarowej testowych zdjęć stereowizyjnych dobrano korzystając z zależności (1.13) [1], dla następujących parametrów układu stereowizyjnego: B=45 mm, f=4.2 mm, p_s=17 μm.

$$r = \frac{B \cdot f}{d_{\max} \cdot p_s}, \tag{1.13}$$

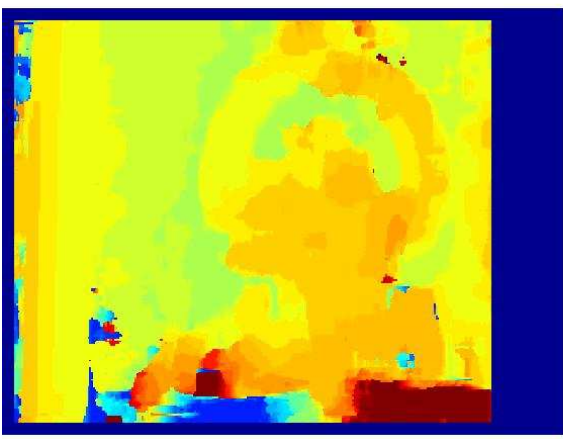
gdzie:

- B – odległość między osiami optycznymi kamer,
- f – ogniskowa pojedynczej kamery (dla dwóch identycznych układów optycznych),
- d_{max} – maksymalna dysparycja,
- p_s – rozmiar pojedynczego piksela wchodzącego w skład matrycy światłoczułej układu rejestrującego obraz.

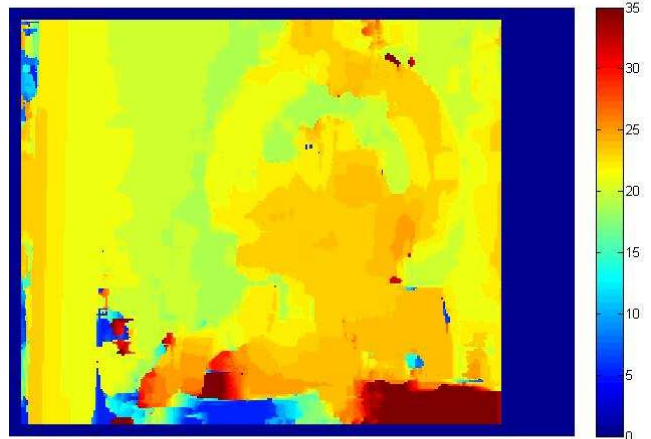
Rozmiary okna korelacji (regionu) ustalono na 9x9 pikseli, natomiast zakres przesunięcia (dysparycji) d_{min}-d_{max} ustawiono w przedziale 5-35 pikseli, zgodnie z wykresem przedstawionym na rys. 7.



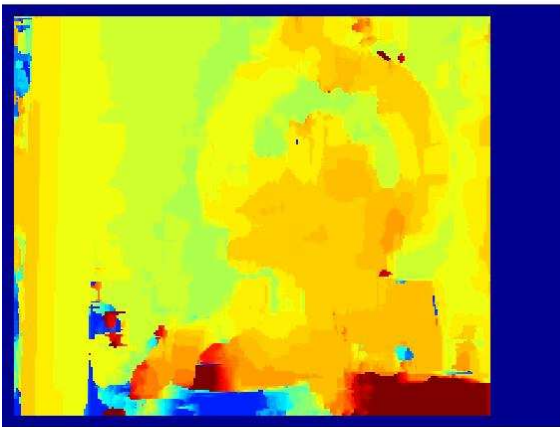
Rys. 7. Przebieg zależności pomiędzy zakresem „widzenia” systemu stereowizyjnego, a dysparycją



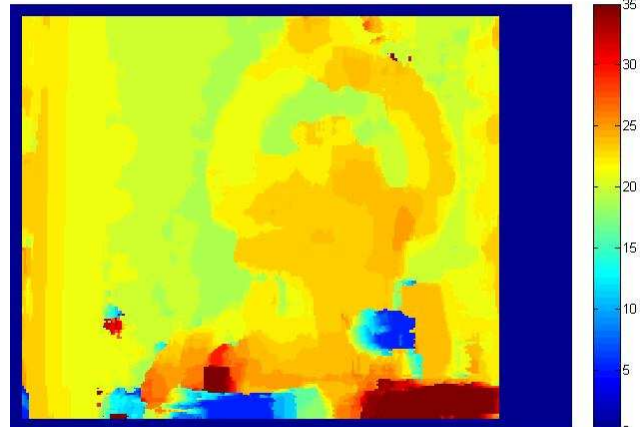
Rys. 8. Mapa dysparycji oparty na mierze LSAD (1.5)



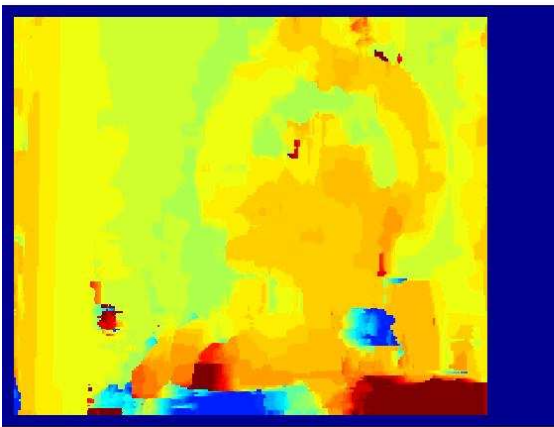
Rys. 9. Mapa dysparycji oparty na mierze LSSD (1.6)



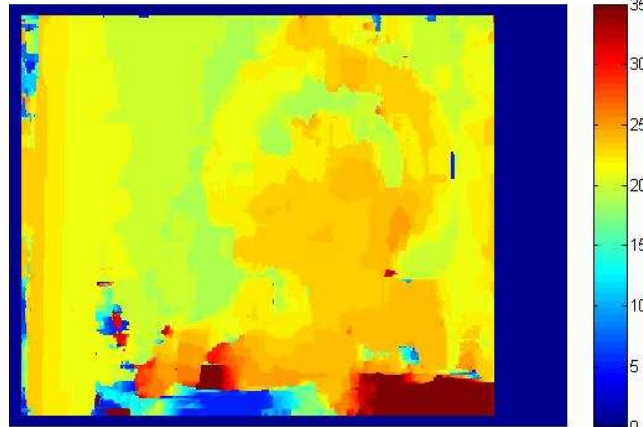
Rys. 10. Mapa dysparycji oparty na mierze NCC (1.7)



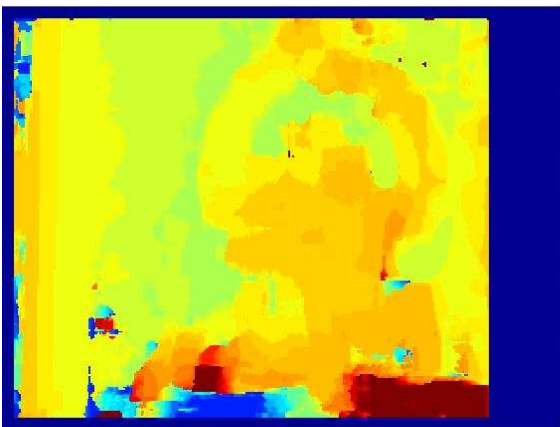
Rys. 11. Mapa dysparycji oparty na mierze SAD (1.8)



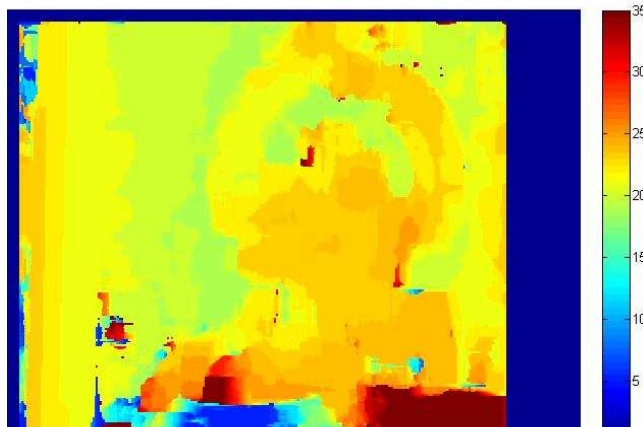
Rys. 12. Mapa dysparycji oparty na mierze SSD (1.9)



Rys. 13. Mapa dysparycji oparty na mierze ZNCC (1.10)

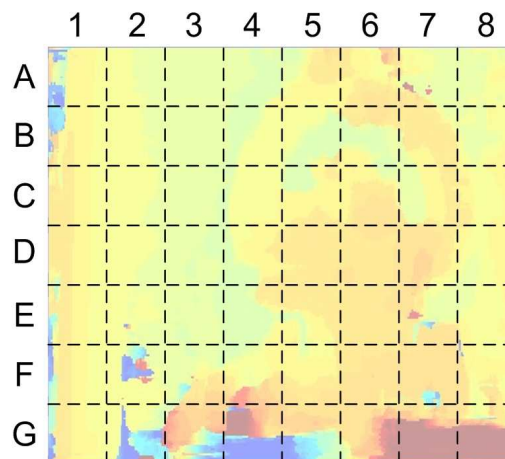


Rys. 14. Mapa dysparycji oparty na mierze ZSAD (1.11)



Rys. 15. Mapa dysparycji oparty na mierze ZSSD (1.12)

W celu możliwości oceny jakościowej wygenerowanych map dysparycji zastosowano metodę oceny, polegającą na dyskretyzacji wygenerowanych map dysparycji na 56 sektorów (rys. 16), a następnie wstępnej wzrokowej oceny zaistniałych różnic i niezgodności.



Rys. 16. Dyskretyzacja mapy dysparycji dla potrzeb oceny wstępnej

Wstępna ocena wizualna wygenerowanych map dysparycji w większości sektorów pozwala stwierdzić znikome różnice w wygenerowanym obrazie. Zmiany dotyczą jedynie granic przenikania się kolorów, a więc tym samym dotyczą różnego stopnia detekcji zarysu (krawędzi) przedmiotów znajdujących się na planie.

Pierwszy zasadniczy błąd odwzorowania dotyczy algorytmów wykorzystujących miarę SAD (rys. 11) oraz SSD (rys. 12), które w sektorze F-7 sygnalizują występowanie pustej przestrzeni. Ten sam błąd dotyczy również innych metod lecz pole powierzchni jego występowania w porównaniu z wcześniej omawianym przypadkiem jest znikomo małe. Jednak na korzyść algorytmów implementujących miarę SAD oraz SSD przemawia poprawne wygenerowanie jednolitej przestrzeni w obrębie sektorów A-1 oraz B-1, gdzie we wszystkich innych przypadkach została wykryta przestrzeń którą można interpretować jako wolne pole.

Druga zasadnicza rozbieżność poprawnego odwzorowania pojawia się we wszystkich rozwiązaniach i dotyczy sektora F-2, w którym wszystkie pozyskane mapy dysparycji lokalizują pole które może odwzorowywać zarówno obiekt znajdujący się w maksymalnym oddaleniu od płaszczyzny obrazowej głowicy stereowizyjnej rejestrującej obraz (sugeruje to zimny kolor granatowy) lub bardzo blisko (ciepły krwistoczerwony kolor). Co interesujące, błąd ten dotyczy w najmniejszym stopniu mapy dysparycji wygenerowanej w oparciu o algorytm implementujący miarę SAD (rys. 11).

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono problematykę obliczania dysparycji, kluczowego elementu w rekonstrukcji sceny trójwymiarowej przy pomocy stereowizji. W artykule opisano osiem metod obliczania miar podobieństwa zaimplementowanych w algorytmy obliczania współczynnika korelacji. Zdjęcia bazowe użyte do testów zarejestrowano metodą stereowizyjną w rozdzielczości 320x240 pikseli oraz przesunięciem 45 mmm.

W ocenie autorów najbardziej korzystna w zastosowaniu obliczania dysparycji dla potrzeb budowy aplikacji implementowanych w autonomicznych urządzeniach transportowych, zarówno w odniesieniu do czasu obliczeń jak i końcowych efektów wizualnych jest metoda SAD. Pomimo pewnych niedoskonałości odwzorowania w porównaniu z innymi algorytmami, miara SAD sprawdziła się pod względem najmniejszego zapotrzebowania na moc obliczeniową komputera (najkrótszy czas realizacji algorytmu) co w pozyskiwaniu mapy dysparycji i dążeniu do rozwiązań działających w trybie quasi rzeczywistym obecnie stanowi czynnik determinujący. Wyselekcjonowanie odpowiedniego algorytmu charakteryzującego się wysoką niezawodnością odwzorowania z jednocześnie względnie niskim zapotrzebowaniem na moc obliczeniową komputera jest istotne ze względu na możliwość zastosowania stereowizji w urządzeniach których specyfika pracy wymaga wysokiego stopnia automatyzacji oraz autonomiczności w wykonywaniu powierzonych zadań typu zautomatyzowane systemy transportowe. Pozyskanie informacji na temat przestrzeni roboczej w której funkcjonuje urządzenie, zaowocowałoby w przyszłości możliwością projektowania bezkolizyjnych trajektorii ruchu oraz pełną automatyzacją pracy systemu środków transportu technologicznego nawet o znacznych gabarytach.

Dążenie do minimalizacji zapotrzebowania na moc obliczeniową komputera przy jednocześnie zadawalających rezultatach determinuje fakt, iż pozyskiwanie gęstej mapy dysparycji nie stanowi jedyne kroku w rekonstrukcji sceny trójwymiarowej przy zastosowaniu stereowizji. Obliczanie różnicowej mapy dysparycji musi być poprzedzone kalibracją kamer pozyskujących lewe oraz prawe zdjęcie wchodzące w skład przyszłego obrazu stereowizyjnego oraz rektyfikacją (wyrównaniem) odpowiadających sobie linii epipolarnych. Tak więc poszukiwanie nowych metod i rozwiązań, a zwłaszcza algorytmów umożliwiających niezawodne odwzorowanie w połączeniu z względnie niskim zapotrzebowaniem na moc obliczeniową komputera stanowi obecnie aktualną problematykę w obszarze działań zorientowanych na przetwarzanie obrazu, mających na celu trójwymiarową rekonstrukcję.

Obecnie pewne nadzieje inżynierów w pozyskaniu w pełni wartościowego obrazu stereowizyjnego wraz z możliwością jego analizowania w trybie czasu rzeczywistego jest związane z rozwijającą się techniką obliczeniową typu *multi-GPU* . (ang. *Graphics Processing Unit*) w której wszelkie obliczenia są realizowane nie przez jednostkę centralną ale przez procesory strumieniowe układu przetwarzającego grafikę. Technologia CUDA (ang. *Compute Unified Device Architecture*) umożliwiającą wykorzystanie procesorów strumieniowych wbudowanych w układy graficzne dla potrzeb rozwiązywania ogólnych problemów numerycznych (w tym obliczanie dysparycji) stanowi ciekawą alternatywę dla tradycyjnych obliczeń bazujących na sekwencyjnych procesorach ogólnego zastosowania.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ahuja S.: *Function compute correlation between two images using various similarity measures with left image as reference*. Electronic document: <http://www.sciweavers.org/tutorials/correlation-based-similarity-measures-summary>, March 2010.
- [2] Ambrosch K., Humenberger M., Olufs S, Schraml S.: *Embedded Stereo Vision*. In: Belbachir A.N. (ed.), *Smart Cameras*. Springer Science, 2010.
- [3] Azzari P.: *Reconstruction from image correspondences*. Università di Bologna, PhD. Thesis, December 2008.
- [4] Brewer N., Liu N., Wang L.: *Stereo disparity calculation in real-world scenes with Informative Image Partitioning*. 25th International Conference of Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ), pp.1-8, 8-9 November, 2010. (ISSN 2151-2191)
- [5] Cramer M.: *Digital camera calibration*. European Spatial Data Research, Dublin 2009.
- [6] Georgoulas Ch., Andreadis I.: *FPGA based disparity map computation with vergence control*. Microprocessors and Microsystems, Article in Press, 15 pages, 2010.
- [7] Karge A.: *Implementation and test of area based correlation detection algorithms*. Department of Informatics and Engineering Science, University of Applied Science Cologne, pp.1-29, Cologne, November 2003.
- [8] Kytö M., Nuutinen M., Oittinen P.: *Method for measuring stereo camera depth accuracy based on stereoscopic vision*. Proc. SPIE 7864, pp.1-9, 2011.
- [9] Lowe D.G.: *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. International Journal of Computer Vision, pp. 1-28, 2004.
- [10] Mandai S., Shi B., Dudek P.: *Binocular disparity calculation on a massively-parallel analog vision processor*. 12th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications CNNA 2010, pp.1-5, 3-5 Feb. 2010.
- [11] Mühlmann K., Maier D., Hesser J., Männer R.: *Calculating dense disparity maps from color stereo images, an efficient implementation*. International Journal of Computer Vision, Vol. 47(1/2/3), pp. 79–88, 2002.
- [12] Ogale A.S., Aloimonos Y.: *A Roadmap to the integration of early visual modules*. Int. J. Comput. Vision, Vol. 72, Issue 1, pp.9-25, 2007.
- [13] Rieck, K., Laskov, P., Sonnenburg, S.: *Computation of similarity measures for sequential data using generalized suffix trees*. In Proceedings of NIPS, pp.1177-1184, 2006.
- [14] Rzeszotarski D, Sawicki P., Ostrowski B.: *Prototypowy system stereowizyjny typu machine vision – Działanie i dokładność*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17b, s.717-727, 2007. (ISBN 978-83-920594-9-2)
- [15] Rzeszotarski D., Strumiłło P., Pełczynski P., Wiecek B., Lorenc A.: *System obrazowania stereoskopowego sekwencji scen trójwymiarowych*. Elektronika: prace naukowe, Nr 10, s.165-184, 2005.
- [16] Storch B., Wierucka I.: *Optyczne pomiary zarysów powtarzalnych z wykorzystaniem technik przetwarzania obrazu*. Acta Mechanica et Automatica, Vol. 1, No.2, str. 59-62, 2007.
- [17] Szpytko J., Hyla P., Gbyl M.: *Sterowanie dźwignicą przy pomocy gestów z użyciem hybrydowego urządzenia wejścia z trójwymiarowym układem odniesienia*. Logistyka, Nr 6, s.3657-3669, 2011. ISSN 1231-5478
- [18] Szpytko J., Hyla P.: *Odwzorowanie przestrzeni roboczej środka transportu technologicznego z użyciem układu wizyjnego*. Czasopismo Techniczne, Tom II, Zeszyt 7, s.505-514, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2011. (ISSN 0011-4561)
- [19] Szpytko J., Hyla P.: *Stereovision 3D type workspace mapping system architecture for transport devices*. Journal of KONES, Vol. 17, No 4, pp.495-504, Warsaw, 2010. (ISSN 1231-4005)
- [20] Szpytko J., Hyla P.: *Work space supervising for material handling devices with machine vision assistance*. Journal of KONBiN, Safety and reliability systems, No. 3-4, pp.7-16, Warsaw, 2009. (ISSN 1895-8281)
- [21] Watman, C. Austin, D. Barnes, N. Overett, G.: Thompson, S.: *Fast sum of absolute differences visual landmark detector*. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. ICRA '04, Vol. 5, pp.4827- 4832, April-May 2004.
- [22] Yang Q., Wang L., Yang R., Stewenius H., Nister D.: *Stereo matching with color-weighted correlation, hierarchical belief propagation and occlusion handling*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 31, No. 3, pp.1-13, March 2009.
- [23] Yong Y.S., Hon H.W.: *Disparity estimation for objects of interest*. World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 43, pp.536-539, 2008.