

Hubert Żabiński  
Krzysztof Wegner  
Jakub Stankowski  
Tomasz Grajek\*  
Katedra Telekomunikacji Multimedialnej i Mikroelektroniki  
Wydział Elektroniki i Telekomunikacji  
Politechnika Poznańska  
ul. Polanka 3, 60-965 Poznań  
[\\*tgrajak@multimedia.edu.pl](mailto:*tgrajak@multimedia.edu.pl)



Poznań, 21-23 czerwca 2017

## WPLYW ALGORYTMÓW DEMOZAIKOWANIA NA DOKŁADNOŚĆ KALIBRACJI SYSTEMÓW WIELOKAMEROWYCH

### THE IMPACT OF DEMOSAICING ALGORITHMS ON THE ACCURACY OF MULTICAMERA SYSTEMS CALIBRATION

**Streszczenie:** Celem pracy jest odpowiedź na pytanie: czy wybór konkretnego algorytmu demosaicowania ma wpływ na dokładność kalibracji systemów wielokamerowych. W ramach pracy zaimplementowano cztery reprezentatywne algorytmy demosaicowania, które wykorzystano do demosaicowania zarejestrowanych sekwencji kalibracyjnych. Proces kalibracji powtarzano wielokrotnie z wykorzystaniem różnych algorytmów. Otrzymane wyniki zostały poddane drobiazgowej analizie w wyniku, której nie wykazano wpływu algorytmów na dokładność kalibracji.

**Abstract:** The aim of this work is to obtain the answer to the following question: does the choice of demosaicing algorithm influence accuracy of multicamera calibration. Four representative demosaicing algorithms have been selected and implemented. Implemented algorithms were then used to demosaic acquired calibration sequences. Calibration process was repeated several times for all algorithms. Obtained results have shown that there are no influence of selected demosaicing algorithm on precision of calibration.

**Słowa kluczowe:** demosaicowanie, matryca Bayera, parametry systemów wielokamerowych,

**Keywords:** bayer matrix, demosaicking, multicamera system parameters

## 1. WSTĘP

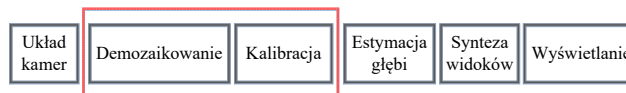
Systemy wielokamerowe są to systemy składające się ze zbioru kamer, które powinny być precyzyjnie zamontowane oraz dokładnie zsynchronizowane. Systemy takie umożliwiają nagrywanie sekwencji wizyjnych zawierających wiele widoków. Każdy z widoków stanowi sekwencję obrazów zmiennych w czasie.

Systemy wielokamerowe stosuje się między innymi w telewizji swobodnego punktu widzenia, stereowizji czy dozorze wizyjnym. Mogą być stosowane także do tworzenia trójwymiarowych modeli obiektów, pomiaru odległości między obiektami lub wielkości przedmiotów.

Telewizja swobodnego punktu widzenia (ang. Free viewpoint Television – FTV) [11] jest aktualnie rozwijanym rozwiązaniem, które w przyszłości może stać się

konkurencją dla tradycyjnej telewizji. Tradycyjna telewizja oferuje widzowi tylko jeden punkt widzenia, wymuszony przez położenie kamer rejestrujących scenę i decyzje realizatora. Dzięki telewizji swobodnego punktu widzenia, widz dostaje możliwość wyboru dowolnego położenia kamery wirtualnej, ale nie tylko wybranej z dostępnego zbioru kamer. Może wybrać widok sceny, z dowolnego położenia pośredniego. Takie rozwiązanie może znacząco wpłynąć na widowiskowość wielu wydarzeń, między innymi spektakli teatralnych czy wydarzeń sportowych.

W niniejszej pracy poruszono tematy związane z kalibracją systemów wielokamerowych oraz demosaicowaniem, gdyż są to dwa początkowe kroki, mające istotny wpływ na dalsze etapy przetwarzania obrazów w systemach wielokamerowych (rys. 1).



Rys. 1. Schemat systemu FTV

## 2. WYBRANE ZAGADNIENIA SYSTEMÓW WIELOKAMEROWYCH

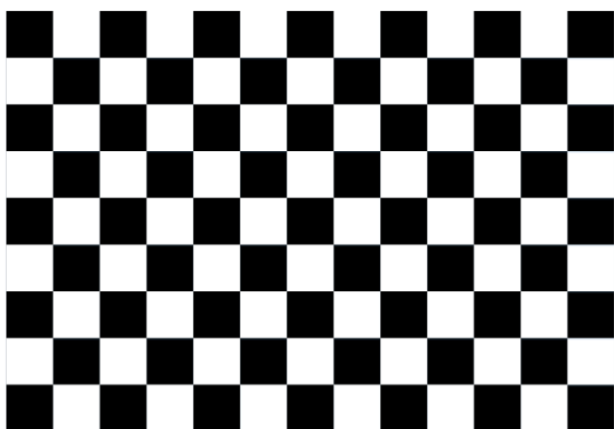
### 2.1. Kalibracja systemów wielokamerowych

Chcąc pracować z systemami wielokamerowymi zawsze musimy dokonać kalibracji systemu (rys. 1) [6]. Niestety, kamery wyprodukowane w tym samym czasie, na jednej linii produkcyjnej, nawet z tej samej serii różnią się między sobą. Wynika to z wielu drobnych różnic, np. inne położenie matrycy względem układu optycznego kamery, czy niedoskonałości samego układu optycznego.

Problem kalibracji polega na znalezieniu parametrów modelu każdej z kamer systemu i ich wzajemnego położenia w przestrzeni. Modelowanie to odbywa się za pomocą parametrów wewnętrznych kamer oraz parametrów zewnętrznych układu kamerowego [3].

Proces kalibracji ma na celu wyznaczenie parametrów wewnętrznych każdej z kamer, współczynników zniekształceń soczewkowych radialnych oraz parame-

trów zewnętrznych układu wielokamerowego. Wyznaczenie parametrów jest możliwe na podstawie nagranych wzorca kalibracyjnego. Zarejestrowane sekwencje są przeszukiwane w celu wyznaczenia punktów charakterystycznych. W poniższej pracy zastosowano algorytm, który jako punkty charakterystyczne wykorzystuje narożniki tablicy kalibracyjnej [3]. Parametrami wewnętrznymi są ogniskowa oraz współrzędne punktu głównego. Parametrami zewnętrznymi rozważanymi w pracy są wektor translacji zawierający informacje o przesunięciach wzdłuż trzech osi układu współrzędnych oraz kąty Eulera. Parametry wewnętrzne wyrażono w jednostce będącą wielokrotnością okresu próbkowania próbek obrazu. Parametry związane z przesunięciem wzdłuż osi układu współrzędnych przedstawiono w jednostce związanej z rozmiarem kwadratów tablicy kalibracyjnej, kąty Eulera przedstawiono w stopniach. Do kalibracji systemu wykorzystywane są specjalne tablice kalibracyjne (rys. 2), których obraz jest następnie wykorzystywany w procesie kalibracji. Wzorzec kalibracyjny musi zostać zarejestrowany z różnych odległości i pod różnymi kątami, przy zachowaniu całkowitej widoczności. Wyznaczanie parametrów wewnętrznych może być zrealizowane niezależnie dla każdej z kamer. W przypadku wyznaczania parametrów zewnętrznych kamery muszą pozostawać w docelowym położeniu w ramach całego systemu.



Rys. 2. Przykładowy wzór tablicy kalibracyjnej

Przy rosnącej liczbie kamer w systemie rośnie złożoność obliczeniowa związana z procedurą kalibracji. Mamy do czynienia z coraz większym zbiorem danych do przetworzenia, przez co proces kalibracji znacząco się wydłuża. Co więcej, bardzo często używa się aparatu lub kamery cyfrowej zawierających matrycę Bayera (przetwornik światłoczuły z nałożonym filtrem Bayera) [1, 2]. Tak zarejestrowane obrazy należy poddać procedurze demozaikowania (interpolacji obrazu w celu uzyskania wszystkich składowych barwnych) przed procedurą kalibracji. W związku z tym, należy upewnić się, czy wyliczone parametry kamer są zgodne z rzeczywistością, pomimo różnic w spotykanych podejściach do demozaikowania oraz wyboru odpowiedniego algorytmu.

**Dokładność kalibracji zależy od dokładności odnalezienia punktów charakterystycznych w obrazie.**

## 2.2. Demozaikowanie

Najpopularniejszym rozwiązaniem stosowanym w kamerach dostępnych na rynku jest matryca przetwornika światłoczułego z nałożonym filtrem Bayera, tak zwana matryca Bayera [1, 2]. Obraz rejestrowany przez matrycę Bayera jest obrazem monochromatycznym, w którym na każdy punkt obrazu przypada tylko jedna ze składowych barwnych (RGB). Istnieje wiele sposobów na przekształcenie takiego obrazu do obrazu kolorowego. Służą do tego tak zwane algorytmy demozaikowania [1, 4, 5, 7, 9, 10].

**Demozaikowanie obrazu, może prowadzić do rozmycia ostrych krawędzi w obrazie.** Wynika to z faktu, iż posiadając tylko jedną z trzech składowych barwnych w każdym punkcie obrazu, trzeba korzystać z sąsiednich próbek, pozwalających na uzyskanie informacji o pozostałych składowych. Demozaikowanie może zniekształcać obraz także w inny sposób. Przykładowo biorąc informacje o brakującej składowej barwnej zawsze od prawego sąsiada, obraz po demozaikowaniu może zostać nieznacznie sztucznie przesunięty w kierunku z którego czerpiemy informacje o składowej barwnej.

## 2.3. Wpływ procesu demozaikowania na dokładność kalibracji

Dokładność kalibracji systemu wielokamerowego zależy od dokładności wyznaczania położenia punktów charakterystycznych. Natomiast, demozaikowanie może rozmywać krawędzie, czyli pogarszać możliwość dokładnego wyznaczenia położenia punktów charakterystycznych. W związku z tym, można domniemywać, iż jakość algorytmów demozaikowania będzie miała wpływ na dokładność procesu kalibracji systemu wielokamerowego.

Z drugiej strony, biorąc pod uwagę wymagania algorytmu znajdującego narożniki kwadratów tablicy kalibracyjnej, można podejrzewać, że wcale nie jest konieczny skomplikowany algorytm demozaikowania. Wyznaczając parametry kamer potrzebujemy dokładnego położenia narożników, których odnalezienie jest możliwe nawet pomimo rozmyć występujących na ostrych krawędziach obrazu. Obraz nie musi wyglądać idealnie. Wystarczającym jest odnalezienie punktów obrazu, w których rzeczywiście występują narożniki.

## 3. CEL PRACY

Praca ta próbuje odpowiedzieć na pytanie jaki jest wpływ wyboru algorytmu demozaikowania na dokładność procesu kalibracji systemu kamerowego.

## 4. WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA

### 4.1. Dokładność a precyzja pomiaru

Opisując metodę pomiaru, najczęściej podaje się dla niej dwie wielkości: dokładność i precyzję metody pomiaru. Dokładność określa jak zmierzona wartość (wyznaczona wartość średnia z wielu pomiarów) np. parametru ma się (jest odległa) od wartości prawdziwej. Natomiast precyzja określa jaki jest rozrzut wielkości zmierzonej od średniej. Najbardziej zależy nam na metodzie zarówno dokładnej jak i precyzyjnej.

Tab. 5. Porównanie wyników wyznaczania parametrów wewnętrznych kamery (u góry) i zewnętrznych systemu kamerowego (u dołu) dla wybranych algorytmów demosaikowania

| parametry wewnętrzne                             | kamera 1 |   |                        |          |   |                        |         |   |                        |         |   |                        |
|--|----------|---|------------------------|----------|---|------------------------|---------|---|------------------------|---------|---|------------------------|
|  | Nearest  |   |                        | Bilinear |   |                        | IAHD    |   | LMMSE                  |         |   |                        |
|  | średnia  | ± | odchylenie standardowe | średnia  | ± | odchylenie standardowe | średnia | ± | odchylenie standardowe | średnia | ± | odchylenie standardowe |
| ogniskowa w płaszczyźnie poziomej                | 2295,19  | ± | 7,91                   | 2295,17  | ± | 7,88                   | 2295,18 | ± | 8,00                   | 2295,32 | ± | 7,93                   |
| ogniskowa w płaszczyźnie pionowej                | 2290,13  | ± | 6,70                   | 2290,05  | ± | 6,71                   | 2289,99 | ± | 6,84                   | 2290,14 | ± | 6,74                   |
| współrzędna x punktu głównego obrazu             | 898,08   | ± | 9,14                   | 898,17   | ± | 9,18                   | 898,39  | ± | 9,14                   | 898,32  | ± | 9,13                   |
| współrzędna y punktu głównego obrazu             | 541,60   | ± | 12,43                  | 541,32   | ± | 12,45                  | 541,16  | ± | 12,36                  | 540,81  | ± | 12,47                  |
| pierwszy współczynnik zniekształcenia radialnego | -0,216   | ± | 0,007                  | -0,217   | ± | 0,007                  | -0,215  | ± | 0,007                  | -0,215  | ± | 0,007                  |
| drugi współczynnik zniekształcenia radialnego    | 0,187    | ± | 0,054                  | 0,187    | ± | 0,054                  | 0,182   | ± | 0,059                  | 0,181   | ± | 0,059                  |

| parametry zewnętrzne      | Nearest |   |                        | Bilinear |   |                        | IAHD    |   | LMMSE                  |         |   |                        |
|---------------------------|---------|---|------------------------|----------|---|------------------------|---------|---|------------------------|---------|---|------------------------|
|                           | średnia | ± | odchylenie standardowe | średnia  | ± | odchylenie standardowe | średnia | ± | odchylenie standardowe | średnia | ± | odchylenie standardowe |
| kąt $\alpha$              | 1,88    | ± | 0,08                   | 1,88     | ± | 0,08                   | 1,88    | ± | 0,09                   | 1,89    | ± | 0,08                   |
| kąt $\beta$               | -12,36  | ± | 0,01                   | -12,37   | ± | 0,01                   | -12,38  | ± | 0,01                   | -12,38  | ± | 0,01                   |
| kąt $\gamma$              | -4,66   | ± | 0,004                  | -4,66    | ± | 0,005                  | -4,66   | ± | 0,005                  | -4,66   | ± | 0,005                  |
| przesunięcie wzdłuż osi X | 507,82  | ± | 0,42                   | 508,67   | ± | 0,44                   | 509,23  | ± | 0,54                   | 509,32  | ± | 0,56                   |
| przesunięcie wzdłuż osi Y | -1,41   | ± | 2,75                   | -1,59    | ± | 2,99                   | -1,53   | ± | 3,24                   | -1,40   | ± | 3,19                   |
| przesunięcie wzdłuż osi Z | -54,18  | ± | 0,33                   | -53,81   | ± | 0,39                   | -54,23  | ± | 0,41                   | -54,59  | ± | 0,42                   |

#### 4.2. Metodologia

W celu odpowiedzi na postawione pytanie, czy wybór algorytmu demosaikowania wpływa na dokładność kalibracji systemów wielokamerowych, zaproponowano następujący eksperyment. Za pomocą wybranego wzorca kalibracyjnego, dokonano wielokrotnej kalibracji pary kamer z macierzą Bayera. Za każdym razem rejestrowany obraz demosaikowano za pomocą innego algorytmu demosaikowania. W celu zbadania powtarzalności wyników proces kalibracji powtarzano wielokrotnie, za każdym razem rejestrując nowe, inne ujęcia wzorca kalibracyjnego. Wyniki (parametry kamer) otrzymane na podstawie obrazu wzorca kalibracyjnego zdemosaikowanego z wykorzystaniem pojedynczego algorytmu, uśredniono, i obliczono wariancję. Wyniki kalibracji otrzymane na podstawie obrazów zdemosaikowanych za pomocą różnych algorytmów porównano ze sobą w celu zbadania wpływu algorytmu na dokładność i powtarzalność procesu kalibracji.

#### 4.3. Wykorzystane urządzenia i zaimplementowane algorytmy

Do badań wykorzystano dwie kamery Basler ava1900-50gc [8]. Są to przemysłowe kamery, wykorzystujące interfejs Gigabit Ethernet (GigE Vision) oraz pozwalające na pobranie obrazu wprost z matrycy światłoczułej z pominięciem jakiegokolwiek przetwarzania. Zastosowany w kamerach filtr Bayera ma postać GB/RG.

Jako reprezentatywne algorytmy demosaikowania wybrano oraz zaimplementowano:

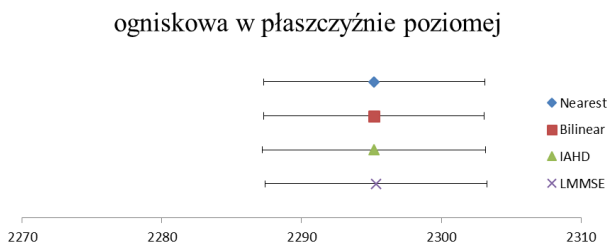
- nearest neighbor interpolation (interpolacja najbliższego sąsiedztwa) [1],
- bilinear interpolation (interpolacja dwuliniowa) [1],
- improved adaptive homogeneity-directed (ulepszona adaptacyjna jednorodność skierowana) [4, 7],
- directional line minimum mean square error demosaicing (demosaikowanie kierunkową estymacją liniowego minimalnego błędu średniokwadratowego) [5].

Pierwsze dwa z wymienionych algorytmów są przykładem prostych i szybkich rozwiązań, jednak obciążonych wadą w postaci niskiej jakości obrazu i widocznych zniekształceń na krawędziach obiektów. Druga para algorytmów (IAHD i LMMSE) to przykłady zaawansowanych technik pozwalających uzyskać doskonałą jakość obrazu, jednak kosztem bardzo wysokiej złożoności obliczeniowej.

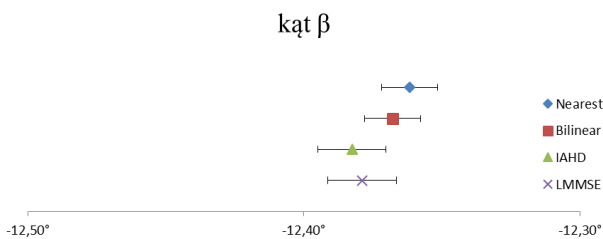
#### 4.4. Wyniki

W tabeli 1 zawarto wyznaczone, uśrednione wartości parametrów kamer oraz uśrednione wartości parametrów zewnętrznych systemu kamerowego wraz z odchyleniem standardowym dla każdego z przetestowanych algorytmów demosaikowania. Parametrami tymi są: ogniskowa wyznaczona w płaszczyźnie pionowej oraz poziomej, współrzędne punktu głównego, przesunięcia wzdłuż osi układu współrzędnych, kąty Eulera, a także dwa współczynniki zniekształceń soczewkowych, radialnych.

Na rysunku 3 przedstawiono porównanie uzyskanych wyników dla wyznaczonej długości ogniskowej przy wykorzystaniu różnych algorytmów demosaikowania. Jak widać wyznaczone wartości są bardzo podobne, a wyznaczone przedziały ufności pokrywają się. Oznacza to że nie ma statystycznie istotnej różnicy pomiędzy otrzymanymi wynikami. Podobnie na rysunku 4 przedstawiono wyznaczony kąt  $\beta$  uzyskany przy zastosowaniu różnych algorytmów demosaikowania. Jak widać, różnice pomiędzy otrzymanymi wartościami są większe, jednak i tu obliczone przedziały ufności nakładają się.



Rys. 3. Porównanie wartości długości ogniskowej w płaszczyźnie poziomej obrazu wyznaczonej dla wybranych algorytmów demosaikowania



Rys. 4. Porównanie wartości kąta  $\beta$  wyznaczonego dla wybranych algorytmów demosaikowania

## 5. PODSUMOWANIE

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że różne algorytmy demosaikowania pozwalają na uzyskanie bardzo podobnych wartości wyznaczanych parametrów kamer. Wyznaczone wartości parametrów są zgodne z oczekiwaniami. Spodziewano się otrzymania takich wyników, ponieważ kamery były ustawione równolegle, na podobnej wysokości, odsunięte od siebie w poziomie. W związku z tym, wartości kątów Eulera są bliskie zera, największe przesunięcie występuje wzdłuż osi X układu współrzędnych ( $\approx 508$ ), pozostałe dwa przesunięcia są nieznaczne (dla osi Y  $\approx -1,5$ , dla osi Z  $\approx -54$ ). Wyznaczenie parametrów zewnętrznych odbywało się, między innymi na podstawie wyznaczonych wcześniej parametrów wewnętrznych. Potwierdza to wysoką precyzję otrzymanych wyników.

Dokładność, z jaką wyznaczono wartości parametrów, jest zadowalająca. Wyniki kalibracji systemu są powtarzalne, również dla kolejnych algorytmów demosaikowania. Wyznaczone wartości odchyłeń standardowych sugerują brak wpływu zastosowanego algorytmu demosaikowania na proces kalibracji systemu wielokamerowego (tab. 1). Wyznaczone odchylenia standardowe nanesione na wykresach widocznie nakładają się.

W związku z powyższym, wyniki można uznać za spójne, o wysokiej precyzji, zgadzające się z wcześniejszymi oczekiwaniami. Dzięki temu można wysunąć wniosek, że brak jest statystycznie istotnej różnicy przy wyborze algorytmu demosaikowania. Innymi słowy brak jest statystycznie istotnego wpływu wyboru algorytmu na dokładność kalibracji systemu wielokamerowego

## INFORMACJA

Praca finansowana ze środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową polegającą na prowadzeniu badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich.

## LITERATURA

- [1] Davies Adrian, Fennessy Phil. 2001. „Digital imaging for photographers (Fourth ed.)”. *Focal Press*.
- [2] Domański Marek. 2010. „Obraz cyfrowy”. *WKiŁ*.
- [3] Dziembowski Adrian, Kueh Agnieszka, Łuczak Adam, Mieloch Dawid, Wegner Krzysztof. 2014. „Realizacja eksperymentalnego systemu telewizji swobodnego punktu widzenia z łukowym ustawieniem kamer”. *Przegląd Telekomunikacyjny* 6/2014: 161-164.
- [4] Frommen T.. 2007. „Adaptive Homogeneity-Directed Demosaicing Algorithm”. [http://gany-med.imib.rwth-aachen.de/lehmann/seminare/bv\\_2007-02.pdf](http://gany-med.imib.rwth-aachen.de/lehmann/seminare/bv_2007-02.pdf).
- [5] Getreuer P., Wu Z.. 2011. „Directional LMMSE Image Demosaicking”. *Image Processing On Line*: 117-126.
- [6] Hartley R., Zisserman A. 2003. „Multiple View Geometry in Computer Vision”. *Cambridge: Cambridge University Press*.
- [7] Hirakawa K., Parks T.W.. 2005. „Adaptive Homogeneity-Directed Demosaicing Algorithm”. *IEEE Transactions on Image Processing* 14(3): 360-369.
- [8] Kamera Basler aviator avA1900-50gm/gc GigE Vision. 2017. <http://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/aviator/ava1900-50gm>
- [9] Lukin A., Kubasov D.. 2004. „High-quality algorithm for Bayer pattern interpolation”. *Program. Comput. Software* 30(6): 347-358.
- [10] Malvar H.S., He L.-W., Cutler R. 2004. „High-quality linear interpolation for demosaicing of Bayer-patterned color images”, *Microsoft Research*.
- [11] Tanimoto Masayuki. 2009. “Overview of FTV (free-viewpoint television)”. *IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME 2009*: 1552-1553.