

**SENSORY WIZYJNE STOSOWANE W SYSTEMACH DO POMIARU SKRAJNI
KOLEJOWEJ I ANALIZA METOD ICH DOBORU**

**VISION SENSORS IN RAILWAY CLEARANCE MEASUREMENT SYSTEMS
AND ANALYSIS OF THEIR SELECTION METHODS**

Regina Tokarczyk¹, Piotr Kohut², Jakub Kolecki¹

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

² AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

SŁOWA KLUCZOWE: skrajnia kolejowa, kamera cyfrowa, kalibracja kamery, radiometria kamery

STRESZCZENIE: Cechy charakterystyczne systemów wizyjnych stosowanych dla potrzeb pomiaru skrajni można podzielić na trzy grupy: opisujące geometrię odwzorowania, radiometrię i specyfikację techniczną kamery. Geometrię odwzorowania wyznacza się w procesie kalibracji kamery, która dostarcza takich parametrów jak położenie środka rzutów w stosunku do układu obrazu oraz współczynniki funkcji aproksymującej błędy obiektywu i nośnika obrazu. Badanie radiometrii zwykle obejmuje wyznaczenie rozdzielczości układu obiektyw-nośnik obrazu, ostrości i kontrastu (funkcja MTF lub SFR, gamma), zakresu tonalnego, szumu, odwzorowania kolorów. Pozyskiwanie obrazów charakteryzują takie czynniki jak częstotliwość akwizycji oraz przepustowość. Porównane zostaną różne przewodowe i bezprzewodowe technologie interfejsów współczesnych kamer, m.in.: GiGE, CameraLink, USB, FireWire, (decydujące o przepustowości, topologii, wymaganiach co do długości kabli, obciążeniu procesora, czy dopuszczalnej ilości urządzeń akwizycji, itp.).

W ramach prowadzonych badań przetestowano kilka reprezentatywnych dla zagadnienia pomiarowego kamer cyfrowych o różnych technologiach interfejsów i wyposażonych w różne obiektywy. W artykule zaprezentowano wyniki kalibracji i testów radiometrycznych wybranych modeli kamer. Wielowariantowa kalibracja geometryczna pozwoliła na zbadanie postawionych problemów:

- jaki jest poziom błędów obrazowania przy zastosowaniu różnych obiektywów,
- czy można w procesie redukcji błędów obiektywu uwzględnić tylko dystorsję radialną i do ilu czynników wielomianu tej dystorsji wystarczy się ograniczyć,
- jakie są błędy szczałkowe obrazu po usunięciu ich optymalnym wielomianem aproksymującym.

Badanie radiometrii zdjęć przeprowadzono z użyciem testu IT8, SFR Plus i oprogramowania firmy Imatest. Skupiono się przede wszystkim na najistotniejszych dla obrazowania na potrzeby pomiaru skrajni cechach: ostrości i kontraście, zakresie tonalnym i odwzorowaniu barw. W wyniku badań określono zestaw cech istotnych dla optymalnego wyboru systemu wizyjnego.

1. WSTĘP

Pomiar skrajni budowli i skrajni ładunku ma decydujące znaczenie dla funkcjonowania i bezpieczeństwa ruchu na liniach kolejowych. Konieczność dostosowania transportu

kolejowego do potrzeb krajowej i unijnej gospodarki implikuje utworzenie sprawnego systemu kodyfikacji linii kolejowych, a pomiary skrajni są jego niezbędnym składnikiem.

Nowoczesne systemy pomiarowe służące temu celowi to systemy zdalne, w maksymalnym stopniu zautomatyzowane i dzięki temu pracujące w trybie dynamicznym. W większości z nich wykorzystuje się sensory wizyjne, pełniące niekiedy rolę podstawowego urządzenia pomiarowego lub też mające znaczenie pomocnicze. Są to najczęściej kamery cyfrowe z matrycą CCD lub CMOS, monochromatyczne lub barwne, rejestrujące promieniowanie w zakresie spektrum widzialnego, ale też w podczerwieni.

Wybór sensora wizyjnego, uzależniony głównie od jego roli w systemie pomiarowym, musi być poprzedzony analizą czynników decydujących o jego przydatności.

Badania, przedstawione w artykule prowadzone są w ramach projektu finansowanego z funduszy Unii Europejskiej „Opracowanie innowacyjnej metodyki i informatycznego systemu zarządzania dla kodyfikacji linii kolejowej – Etap I”.

W ramach pierwszego zadania tego projektu wykonano badania charakterystyki kilku reprezentatywnych dla tego zastosowania sensorów wizyjnych. Wyniki wybranych zaprezentowano w artykule.

2. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMÓW DO POMIARU SKRAJNI, ROLA SENSORÓW WIZYJNYCH W POSZCZEGÓLNYCH SYSTEMACH POMIAROWYCH ORAZ STAWIANE IM WYMAGANIA

Rozwój systemów do pomiaru skrajni kolejowej zmierza do uzyskania wyników pomiaru w jak najkrótszym okresie czasu bez utraty jakości tych wyników. Wiodące współczesne systemy pracują przy prędkości platformy nośnej ponad 100 km/godz., dostarczając pomiaru w profilach prostopadłych do osi toru w odstępach kilku centymetrów. Mogą pracować zarówno przy świetle dziennym, jak i przy sztucznym, a te które pracują w oparciu o systemy wizyjne w podczerwieni – nie wymagają żadnego oświetlenia. Bazują one generalnie na trzech technologiach pomiarowych lub ich integracji: klasycznej metodzie fotogrametrycznej wykorzystującej najczęściej parę zdjęć, metodzie profili świetlnych zadawanych światłem lasera rejestrowanych przez kamerę cyfrową oraz metodzie opartej o pomiary wykonywane z użyciem dalmierza laserowego lub dalmierczego skanera laserowego (LIDAR).

Metoda fotogrametryczna opiera się na odtworzeniu przebiegu homologicznych promieni rzutujących na podstawie pary obrazów pozyskanych z dwóch kamer o znanych parametrach rzutowania, znanym położeniu względem siebie i względem osi toru. Pomiar elementów potencjalnie kolizyjnych następuje na obrazach w rejonach wpasowanego w nie wektora obrysu skrajni prostopadłej do osi toru w zadanych odległościach. Wzajemne ułożenie kamer może być traktowane jako stałe (systemy Leader2000 RMMS) lub może być korygowane w oparciu o fotopunkty umieszczone na sztywnej ramie na platformie nośnej systemu i pojawiające się na każdym zdjęciu (LIMEZ II i UPS80 GRAW)

W metodzie profili świetlnych rzutowane przez skaner profile prostopadłe do osi toru są zapisywane na kolejnych klatkach kamery CCD. Skalibrowane położenie lasera profilującego względem kamery pozwala wyznaczyć dla każdego piksela zobrazowanego profilu jego terenowe współrzędne na zasadzie triangulacji.

W systemach z dalmierzem laserowym sensory wizyjne są uzupełnieniem urządzenia mierzącego, umożliwiając identyfikację obiektów reprezentowanych przez wynik pomiaru –

chmurę punktów. Realizowane jest to przez wczytanie profilu uzyskanego z chmury na zdjęcie lub też przez użycie zdjęcia do nadania punktom chmury atrybutu: jasności lub barwy.

Cyfrowe kamery wideo wykorzystywane są jako uzupełniające urządzenia do rejestracji przebiegu mierzonej trasy. Pozyskane za ich pomocą obrazy pozwalają na przykład na odczytywanie znaków pomocnych dla identyfikacji położenia profilu skrajni wzdłuż trasy.

W zaawansowanych systemach do pomiaru skrajni może być użyta więcej niż jedna metoda pomiarowa, na przykład profil skrajni może być mierzony z użyciem skanera dalmierczego, oś toru może być wyznaczana metodą profili świetlnych, a pomiar uzupełniający dla obiektów o niewielkim rozmiarze wzdłuż osi toru może być dokonywany metodą fotogrametryczną (LIMEZ III).

Jak wynika z powyższej klasyfikacji, rola sensorów wizyjnych w systemach pomiarowych bywa różna, jak również różne są wobec nich wymagania. Dotyczą one różnych cech sensorów i związanych z nimi parametrów. Na przykład tam, gdzie sensor jest zasadniczą częścią urządzenia pomiarowego, potrzebna jest dokładna znajomość parametrów opisujących model kamery: orientacji wewnętrznej, dystorsji obiektywu, błędów geometrycznych matrycy, pożądana jest wysoka rozdzielczość sensora. W metodzie fotogrametrycznej ważny jest dobry kontrast oraz duży zakres dynamiczny i tonalny sensora. Z kolei dla systemu opartego o profile świetlne ważna jest duża częstotliwość akwizycji, a także odpowiedni zakres spektralny sensora.

Kamery służące do kolorowania chmury punktów powinny odznaczać się dobrym przenoszeniem barw, dużym zakresem przenoszenia gęstości optycznej, dobrą kontrastowością i dobraną do gęstości chmury punktów rozdzielczością.

3. CECHY SENSORÓW WIZYJNYCH I ZWIĄZANE Z NIMI PARAMETRY

3.1. Geometria odwzorowania

Kamery mogą odgrywać w systemach wizyjnych różną rolę. Pozyskiwane przez nie obrazy używane są do teksturowania modeli 3D, kolorowania chmur punktów pozyskanych na drodze skanowania laserowego czy też do wykonywania pomiarów fotogrametrycznych. Kamery mogą również pełnić rolę sensora wspomagającego system GNSS/INS, poprawiając dokładność wyznaczania parametrów ruchu platformy systemu mobilnego (Bayoud 2006, Griessbach *et al.*, 2010). W każdym z powyższych przypadków niezbędna jest znajomość geometrii odwzorowania, a zatem konieczne jest wyznaczenie elementów orientacji wewnętrznej kamery, a także błędów odwzorowania.

Najczęściej wykorzystywane w fotogrametrii modele kamery to model perspektywiczny, oraz równanie DLT. Zwięzłe porównanie tych modeli przedstawia Grün (2001, strony 7–15). Parametry pierwszego modelu mają interpretację fizyczną w postaci elementów orientacji wewnętrznej i zewnętrznej, a także współczynników dystorsji. Model ten wyrażony jest równaniem kolinearności.

Spośród różnych modeli zniekształceń obrazu, dla kamer niemetrycznych często stosuje się model dystorsji Browna (Brown 1971), zawierający trzy współczynniki dystorsji radialnej obiektywu, dwa tangencjalnej oraz dwa współczynniki zniekształcenia afinicznego sensora.

Bardzo istotny, zwłaszcza pod kątem zastosowania w systemach mobilnych jest taki wybór parametrów zniekształceń obrazu, aby wyjaśniały one w sposób wystarczający

modelowane zjawisko. Zarówno nadparametryzacja jak i niedobór parametrów będzie w sposób istotny rzutował na dokładność odwzorowania lub też wyznaczenia współrzędnych terenowych (Habib *et al.*, 2010). Dzieje się tak dlatego, że w przypadku systemów mobilnych elementy orientacji zewnętrznej wyznaczane są na drodze ich bezpośredniego pomiaru (GPS, INS) a nie z wykorzystaniem fotopunktów. Wykorzystanie fotopunktów do orientacji zdjęć sprawiałoby, że błędy wyznaczenia zniekształceń obrazu lub niedobór parametrów je opisujących kompensowany byłby częściowo przez odstępstwo elementów orientacji zewnętrznej od ich faktycznych, fizycznych wartości.

Alternatywny sposób zapisu perspektywicznego modelu kamery znaleźć można w literaturze z zakresu robotyki oraz widzenia komputerowego. Parametry opisujące w nim błędy odwzorowania związane z nierówną skalą osi układu obrazu oraz z ich nieprostokątnością budują macierz kamery K , przy czym skalowanie modelowane jest w taki sposób, że każdej z osi przypisywana jest inna stała kamery (ck_x, ck_y). Wyznaczanie błędów obrazu w przypadku zastosowań robotycznych bardzo bliskiego zasięgu przeprowadzane jest często na płaskim polu testowym, często w postaci szachownicy (Zhang 1999).

Elementy orientacji zewnętrznej kamery występujące w równaniach modelu perspektywicznego mogą odgrywać różną rolę w zależności od typu kamery wykorzystywanej w systemie mobilnym. Jeżeli w ramach jednego zdjęcia obraz tworzony jest poprzez naświetlanie kolejnych linijek sensora (ang. *rolling shutter*), wtedy każda z nich będzie posiadała inne elementy orientacji zewnętrznej. W przeciwnym przypadku, czyli naświetlenia wszystkich linijek naraz (ang. *global shutter*), cały obraz będzie posiadał jednakowe elementy orientacji zewnętrznej. Efekt *rolling shutter* jest widoczny, jeżeli obrazy pozyskiwane są w trakcie ruchu z dużą prędkością (Kolecki *et al.*, 2010). Do budowy systemów mobilnych wysokiej prędkości powinno stosować się kamery z migawką typu *global shutter*.

3.2. Radiometria

Sensory wizyjne wykorzystywane przy pomiarze skrajni pracują w granicznych warunkach oświetleniowych, obrazują obiekty zarówno w głębokich cieniach, jak i w pełnym słońcu. W warunkach dynamicznych nie sprawdza się automatyczny dobór parametrów ekspozycji. Zatem cechy radiometryczne sensora mogą być decydującymi przy jego wyborze.

Na radiometrię sensora ma wpływ układ obiektyw-matryca. Podstawowe cechy radiometryczne sensora takie jak czułość, rozdzielczość radiometryczna (zakres tonalny), rozdzielczość spektralna i zakres spektralny zapisane są w specyfikacji sensora. Czułość kamery jest z reguły większa dla pracy w trybie monochromatycznym niż dla trybu RGB, standardowy zakres tonalny to 8 bitów na kanał, ale często spotkać też można zakresy większe (10-, 12-, 14-bit).

Oprócz powyżej wymienionych cech sensor określają jeszcze:

- Ostrość, kontrastowość, rozdzielczość

Cechy te określone są przez Funkcję Przenoszenia Modulacji (Modulation Transfer Function lub Spatial Frequency Response), która mówi o odpowiedzi systemu optycznego w zależności od częstości przestrzennej sygnału. Podaje ona znormalizowaną wielkość kontrastu dla danej częstości wyrażanego przez iloraz różnicy przez sumę wartości jasności maksymalnej i minimalnej transferowanej przez sensor. Normalizacja jest dokonywana przez wartość kontrastu w najmniejszych częstościach sygnału. Wartość funkcji MTF dla idealnego sensora wynosi 1, natomiast dla sensora rzeczywistego przyjmuje się, że najbar-

dziej wymiarną wielkością odpowiadającą postrzeganej jakości i ostrości obrazu jest częstość, dla której kontrast spada o połowę w stosunku do wartości dla niskich częstości (MTF50). Częstość przestrzenna (rozdzielczość sensora) wyrażana jest w cyklach na piksel, w parach linii na milimetr, jak również jako stosunek grubości linii do wymiaru podłużnego lub poprzecznego matrycy sensora. Na MTF sensora składają się MTF obiektywu i matrycy.

MTF wyznaczana jest na podstawie testów przedstawiających pionowe linie czarno-białe o różnej grubości (wzorzec Normana-Korena), rozmieszczonych w różnych miejscach testu (wzorzec ISO 12233), mogą to być również prostokąty/kwadraty/linie obrócone o mały kąt (test SFR Imatest – metodą przekoszonej krawędzi).

- Zakres dynamiczny, odpowiedź tonalna, gamma

Zakres dynamiczny sensora to stosunek maksymalnej ilości światła, jaką sensor może uchwycić, do minimalnej jego ilości. Maksymalny poziom sygnału jest zależny od pojemności detektora, natomiast minimalny jest wynikiem szumu. Kamery o dużym zakresie dynamicznym w tym samym czasie mogą zarejestrować bardzo silnie oświetlone obiekty, jak i bardzo głębokie cienie. Natomiast zakres tonalny to liczba poziomów sygnału mieszcząca się w zakresie dynamicznym.

Przykładowo: detektor matrycy CCD Sony ICX285 ma pojemność 16 000 elektronów, a poziom szumu to 4,5 e. Zakres dynamiczny matrycy to $16\,000/4,5$. W celu wykorzystania pełnego zakresu tej dynamiki jest dobrany przetwornik 12-bitowy, dający 4096 poziomów tonalnych. Informację o zakresie dynamiki można znaleźć w szczegółowej specyfikacji sensora.

Odpowiedź tonalna to zależność sygnału od ilości światła, przedstawiana w postaci wykresu. Gamma to nachylenie krzywej tonalnej odpowiedzi, które jest wskaźnikiem kontrastu.

Wyznacza się je na podstawie testu w postaci klina szarego, czyli szeregu pól o zmiennej jasności (testy: IT8.7, ISO-15739, ITE Grayscale, SFRplus 20-patch stepchart).

- Dokładność odwzorowania barw

Mierzona jest różnymi wskaźnikami obliczanymi na podstawie różnic między referencyjnymi barwami a barwami odwzorowanymi przez sensor. Mogą to być np. (Pirowski i Tokarczyk, 2006):

- średni poziom jasności pikseli na obrazie różnic w poszczególnych kanałach,
- odchylenie standardowe poziomu jasności pikseli na obrazie różnic,
- średni błąd kwadratowy (RMS),
- maksymalne wartości różnic (in plus i in minus),
- wskaźnik Walda.

Na podstawie badania dokładności odwzorowania barw wyznaczana jest macierz korekcji barw, pozwalająca na poprawienie obrazu w *post-processingu*. Odwzorowanie barw wyznaczone jest za pomocą testów barwnych (IT8.7, Colorcheck, QPcard 201, Chroma-DuMonde 28/28R), dla różnych rodzajów balansu bieli sensora.

- Poziom szumów

Szum jest wynikiem przypadkowych zmian jasności pikseli obrazu wyrażający się odchyleniem od średniego poziomu dla jednakowych jasności referencyjnych obrazowanych przez sensor. Jego miarą jest średnie odchylenie standardowe wyznaczone dla różnych poziomów jasności. Poziom szumów detektorów podawany jest w szczegółowej specyfikacji kamery, natomiast może być zbadany na podstawie testów zawierających klin szary (IT8.7).

3.3. Specyfikacja

Obrazy analizowanych obiektów sceny pozyskiwane są przez jedną lub więcej analogowych lub cyfrowych kamer z odpowiednio dobraną optyką. W zależności od aplikacji kamery mogą pracować w standardzie monochromatycznym RS-170 (30kl/sek, Japonia, USA), lub CCIR (25 kl/sek, Europa, Australia), lub dla kamer kolorowych PAL/SECAM (25 kl/sek), NTSC (30kl/sek). Obecnie interfejsy analogowe głównie ze względu na oferowane różne standardy wideo oraz wprowadzone nowe cyfrowe technologie nie znajdują zastosowania w nowoczesnych systemach skanowania.

Kamery cyfrowe mogą pracować z wybieraniem liniowym, międzyliniowym lub progresywnym z różnymi matrycami światłoczułymi CCD, CMOS, CID. Częstotliwość akwizycji obrazu waha się od kilku do nawet miliona klatek na sekundę (Phantom v12). Zakresy rozdzielczości kamer dochodzą do 29 Mpikseli. Stosowane interfejsy dla kamer cyfrowych: USB, FireWire, CameraLink, LVDS RS422, RS644, LVDS, GiGE. Natomiast do najbardziej powszechnych cyfrowych standardów stosowanych w systemach wizyjnych należy wymienić interfejsy: USB 2.0, IEEE 1394a & 1394b (Firewire), CameraLink, Gigabit Ethernet (GigE).

Jednym z kluczowych aspektów przy doborze optymalnego rozwiązania sprzętowego jest wybór odpowiedniego interfejsu pomiędzy kamerą a kartami akwizycji sygnału wideo. Obecnie na rynku dostępnych jest kilka standardów, różniących się między sobą szybkością transmisji, maksymalną długością przewodów, maksymalną liczbą obsługiwanych urządzeń, itp. Przy doborze interfejsu bardzo ważne jest określenie wszystkich istotnych parametrów interfejsu, które będą wystarczające do realizacji danego zadania. W tabeli 1 przedstawiono podział powszechnie stosowanych interfejsów kamer łącznie z ich charakterystyką.

W odniesieniu do mobilnych systemów skanujących najlepszym rozwiązaniem są kamery z interfejsami GigE oraz FireWire. Interfejsy te umożliwiają podłączenie wielu kamer przy utrzymaniu wysokiej przepustowości. Charakteryzują się łatwością obsługi i sterowania parametrami kamery oraz możliwością bezpośredniego zasilania kamer poprzez interfejs. Zarówno GigE jak i FireWire kompatybilne są z nowym standardem programowalnego interfejsu GenICam. GenICam zapewnia ujednolicony programowalny interfejs dla kamer różnych producentów, co radykalnie ułatwia sterowanie i dostęp do wszystkich parametrów kamery. Standardy GigE, FireWire łącznie z GenICam oferują wiele funkcji, które implementowane są przez producentów w ten sam sposób. Gwarantuje to pełną wymiennalność kamer różnych producentów i zmniejsza ryzyko popełnienia błędów programistycznych i pracochłonność projektów. Przykładem użycia interfejsu GigE w mobilnym systemie skanującym Riegl'a jest wielo-kamerowy układ VMX-250-CS6 z opcją podłączenia 6 kamer o rozdzielczościach 1.4,2, i 5 Mpikseli przy częstotliwości akwizycji, kolejno: 20, 32 i 8 ramek na sekundę.

CameraLink zapewnia bardzo wysoką przepustowość między kamerą a komputerem (680MB/s), ale sam standard nie oferuje tak wielu funkcji co nowsze standardy, dodatkowo każdy producent kamer mimo szerokiego spektrum zaimplementowanych funkcji realizuje je odmiennie. Interfejs **USB** popularny jest w kamerach domowych oraz w kamerach mikroskopowych i naukowych, ale nie jest zdefiniowany jako standard wizyjny. Nie posiada również dobrze opracowanych sterowników do złożonych konfiguracji, np. układów wielu kamer.

Tab. 1. Charakterystyka najpopularniejszych interfejsów kamer

Interfejs	USB	IEEE 1394 (FireWire)	CameraLink	Gigabit Ethernet (802.3ab)
Standardy kamer	Brak	DCAM/DCAMIII v1.3	Camera Link	GiGE Vision
Przepustowość danych (obrazu)	USB 2.0 480 Mb/s USB 3.0 4,8 Gb/s	(1394a) 400Mb/s (1394b) 800Mb/s	2.3Gb/s	1 Gb/s –10Gb/s
Przepustowość magistrali	30–47MB/s (90%)	1394a video: 31.25MB/s (80%) Całk. ok.40MB/s 1394b video: 62.5MB/s (80%) Całk. ok.85MB/s	255MB/s (base) 680 MB/s (full)	80–100MB/s
Topologia	master-slave	peer-to-peer	master-slave	sieciowa P2P
Długość kabla		4,5m / 10m	15m/5m (niska/wysoka prędkość)	100m (Cat5e/6/7)
Maksymalna długość kabla	30 m (hub 5 × 6 m)	75m (repeater) 500m (światłowód)	500m (konwerter +światłowód)	b.d
Ilość złączy na kablu	4	(1394a) 6 (1394b) 9 (kabel), 2 (światłowód)	26 (base) 52 (medium-full)	8 (RJ-45)
Zasilanie poprzez interfejs /magistralę	do 0.5A @ 5V	do 1.5A@8-36V	Brak PoCL (power of camera link – tylko niektóre typy kamer)	Brak PoE (Power over Ethernet – niektóre kamery)
Konieczność stosowania kart akwizycji obrazu	opcjonalnie	opcjonalnie	tak	niewymagana
Ilość urządzeń	127	63	1 / interfejs	zależna od oprog. i dostępnej przepustowości
Obciążenie komputera typu PC	średnie-niskie	bardzo niskie	bardzo niskie	średnie
System operacyjny	Windows, Linux	Windows, Linux	Zależny od sprzedawcy	Windows, Linux
Rozdzielczości czujnika	od VGA do 10 Mpikseli (UI-149X)	od VGA do 16Mpikseli (Pike F1600)	od VGA do 22 Mpikseli (Pantera 22M04) 29Mpix (Imprex bobocat ICL-B6620)	od VGA do 16 Mpikseli (GE4900) 29Mpix(Imprex bobocat IGV-B6620)
Łatwość synchronizacji WE/WY	bardzo mała	mała	bardzo dobra	mała

Producenci kamer zwiększają asortyment swoich produktów o nowe, bardziej zaawansowane technicznie urządzenia. Różnorodność dostępnych urządzeń pozwala na bardziej optymalne dopasowanie sprzętu do konkretnej aplikacji, a tym samym redukuje koszt całego systemu wizyjnego. Poniżej przedstawiono wybranych producentów kamer

oraz integratorów i dostawców asortymentu wizyjnego. *Producenci kamer przemysłowych:* Adimec, Allied, Arecont Vision, Atmel, Basler, Baumer, CyberOptics, Hitachi, Imaging solution, IMI, Imprex, PixeLINK, Pleco, JAI, Kappa, Matrox, National Instruments, Photonfocus, Point Gray, Sony, Toshiba, Vosskuhler, *w tym szybkich kamer cyfrowych:* Basler, Cyclocam, Dalsa, DRD Technologies, FastVision, IDT, Mikrotron, NAC Image Technology, Optronis, Olympus, PCO, Photron, Photonfocus, Redlake, Shimadzu, Vision Research (np. kamera Phantom v711 $1280 \times 800@7,5\text{kHz}$, $128 \times 8@1,4\text{MHz}$); *układów wielokamerowych:* Point Gray (Ladyburg2, Ladyburg3: 6 kamer Sony CCD bazujących na interfejsie IEEE 1394b), Immersive Media (Dodeca 2360 camera, 11 kamer Sony sterowanych poprzez interfejs Gigabit); *integratorzy i dostawcy:* Avicon, Cognex, CRI Jolanta, EC Test System, Elautec, Graftek, Imaco, Optosoft, Omron, Keyence, Parameter, Sick, Stemmer Imaging.

Oferowane rozdzielczości kamer rozciągają się od VGA do 29 Mpikseli, a częstotliwością rejestracji od kilku do kilku tysięcy ramek na sekundę (przy pełnej rozdzielczości).

4. BADANIE GEOMETRII ODWZOROWANIA

Wykonano kalibrację kamery Phantom V9.1 (www: Vision Research) z trzema obiektami. Zdjęcia do kalibracji wykonano na polu testowym AGH. Dla każdego obiektywu pozyskano 5 zdjęć, przeprowadzono pomiar punktów wiążących i fotopunktów oraz wyrównano sieć wiązek z samokalibracją. Obliczenia wykonano w autorskim programie Bundle Adjustment Toolbox for Matlab (Jakub Kolecki, Katedry Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH) przyjmując różny zestaw parametrów opisujących błędy obrazu. Tabela 2 przedstawia estymatory średnich błędów spostrzeżenia typowego (σ_0) a także wartości średnich błędów kwadratowych obserwowanych współrzędnych obrazowych przy różnym doborze parametrów modelu Browna (Brown 1971) błędów obrazu. Jak pokazują zamieszczone wyniki, rozkład dystorsji radialnej obiektywu Distagon 25 mm optymalnie modelowany jest za pomocą dwóch pierwszych współczynników wielomianu składowej radialnej. Uwzględnianie składowej stycznej nie prowadzi do spadku wartości błędów. Z kolei dystorsja obiektywu Planar $f=50$ mm może być opisana za pomocą tylko jednego współczynnika (k_1). W odróżnieniu od dwóch pozostałych obiektywów, układ kamera-obiektyw Sigma cechuje się także dystorsją tangencjalną.

Tabela 2. Estymatory błędów średnich spostrzeżenia typowego oraz średnie błędy kwadratowe pomiarów na zdjęciach w zależności od doboru parametrów modelu. Czcionką pogrubioną oznaczono wyniki dla modelu optymalnego

	Distagon $f = 25$ mm $s = \infty$			Planar $f = 50$ mm $s = 10$ m			Sigma $f = 24 - 70$ mm $f = 24$ mm, $s = \infty$		
	σ_0	RMSE x [px]	RMSE y [px]	σ_0	RMSE x [px]	RMSE y [px]	σ_0	RMSE x [px]	RMSE y [px]
k_1	0.47	0.13	0.14	0.29	0.07	0.08	0.35	0.10	0.08
k_1, k_2	0.44	0.12	0.13	0.29	0.07	0.08	0.33	0.09	0.08
k_1, k_2, p_1, p_2	0.44	0.12	0.13	0.28	0.07	0.08	0.27	0.08	0.08

Parametry opisujące błędy obrazu muszą być nie tylko odpowiednio dobrane z punktu widzenia ich wyznaczalności. Ważne jest również, aby błąd ich wyznaczenia był jak najmniejszy. Dotyczy to również elementów orientacji wewnętrznej. Ważne jest zatem, aby

pole testowe do kalibracji kamery zapewniało dobrą wyznaczalność oraz wysoką dokładność estymacji wszystkich parametrów obliczanych w procesie wyrównania. Najkorzystniej aby było to pole testowe przestrzenne o względnie dużych rozmiarach i dużej głębi.

Kalibrację obiektywu Distagon przeprowadzono również w autorskim oprogramowaniu Katedry Robotyki i Mechatroniki Wydziału Inżynierii Robotycznej i Mechatroniki AGH oraz w komercyjnym oprogramowaniu TEMA. Głównym celem było porównanie funkcjonalności metodyki kalibracji wykorzystującej te programy z kalibracją wykorzystującą program do wyrównania sieci zdjęć Bundle Adjustment Toolbox for Matlab. Programy Open CV Camera Calibration oraz TEMA wymagają wykonania kilkunastu do kilkudziesięciu zdjęć tablicy kalibracyjnej w postaci szachownicy. Pozwalają one na w pełni automatyczne i bardzo szybkie przeprowadzenie procesu kalibracji. Nie są to jednak programy mogące przeprowadzić obliczenie kalibracji dla przestrzennego pola testowego. Dodatkowo zdjęcia tablicy kalibracyjnej muszą być wykonywane z niedużej odległości, co stanowi barierę dla pozyskania wystarczająco ostrych obrazów zwłaszcza jeżeli obiektyw ogniskowany jest na odległość większą niż kilkanaście metrów lub na nieskończoność, co jest typowe dla większości różnego rodzaju systemów mobilnych. Program Open CV Camera Calibration narzuca estymację wszystkich parametrów modelu Browna. Nie ma możliwości wyłączenia wyższych współczynników dystorsji radialnej czy też współczynników dystorsji tangencjalnej. W odróżnieniu od programu Open CV Camera Calibration, program TEMA pozwala na praktycznie dowolną kompozycję modelu zniekształceń obrazu. Niestety ani program Open CV Camera Calibration ani TEMA nie posiadają możliwości wprowadzania do wyrównania elementów orientacji wewnętrznej czy też parametrów modelu Browna jako wielkości obserwowanych, poprzez dołączenie tzw. równań pseudoobserwacji.

5. BADANIE CECH RADIOMETRYCZNYCH

W ramach badań wykonano radiometryczne pomiary testowe dla kilku kamer, monochromatycznych i barwnych, o różnej rozdzielczości geometrycznej, rodzajach i wymiarach matryc, z różnymi obiektywami. Wykonano badania kamer:

- Phantom V9.1 z obiektywami: Distagon 25/2,8, Planar 50/1,4, Sigma 24-70/2,8,
- μ Eye 1545LE z obiektywami: Pentax 12/1,2 i Computar 16/1,4
- Manta G145 z obiektywami: Tamron 8/1,4, JHF 16/1,4, Pyxis 12/1,8
- Prosilica GC2450C/2450C z obiektywami: Tamron 8/1,4, JHF 16/1,4, Pyxis 12/1,8

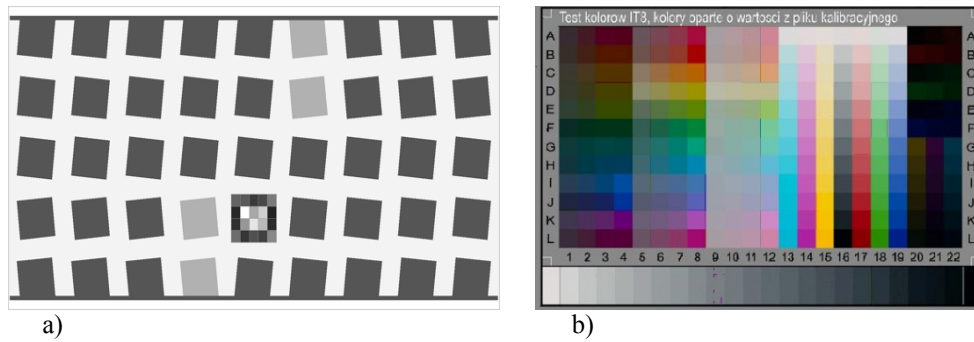
Wybór sensorów został dokonany na podstawie informacji o sensorach użytych w istniejących nowoczesnych systemach do pomiaru skrajni.

Do badań wykorzystano:

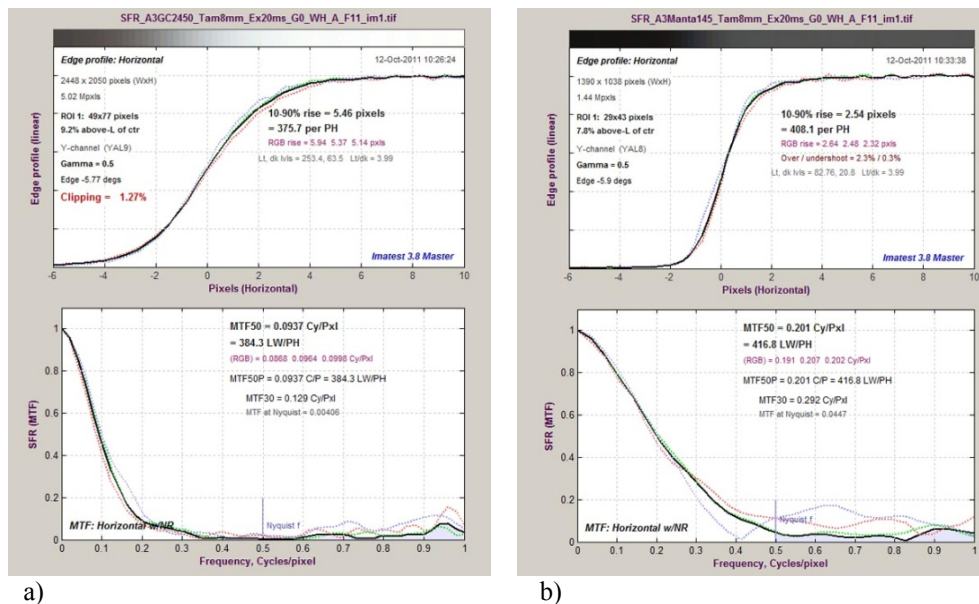
- test refleksowy SFR Imatest wydrukowany na materiale fotograficznym formatu A3 na drukarce o rozdzielczości 1600 dpi na podstawie pliku dostępnego na stronie Imatest (Rys. 1a), oświetlony światłem rozproszonym, białym (światło dzienne),
- test transparentny IT8.7 firmy LaserSoft Imaging (Rys. 1b) z plikiem referencyjnym, podświetlony światłem rozproszonym, białym (światło dzienne),
- oprogramowanie Imatest Master SFR Plus oraz Imatest Master Multicharts.

Test refleksowy posłużył głównie do określenia MTF, zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. Za pomocą testu IT8.7 wyznaczono charakterystykę przenoszenia barw, odpowiedź tonalną i wartość gamma.

Rysunek 2 przedstawia wykresy ostrości krawędzi oraz funkcji MTF kamery Prosilica z obiektywem Tamron 8/1,4 wykonany przy przysłonie 1:11 (rys. 2a) i kamery Manta z tym samym obiektywem i przy tym samym otworze względnym (rys. 2b), wykonany na teście SFR Plus z użyciem oprogramowania Imatest Master SFR Plus.



Rys. 1. Test SFR Plus a), test IT8.7 b)

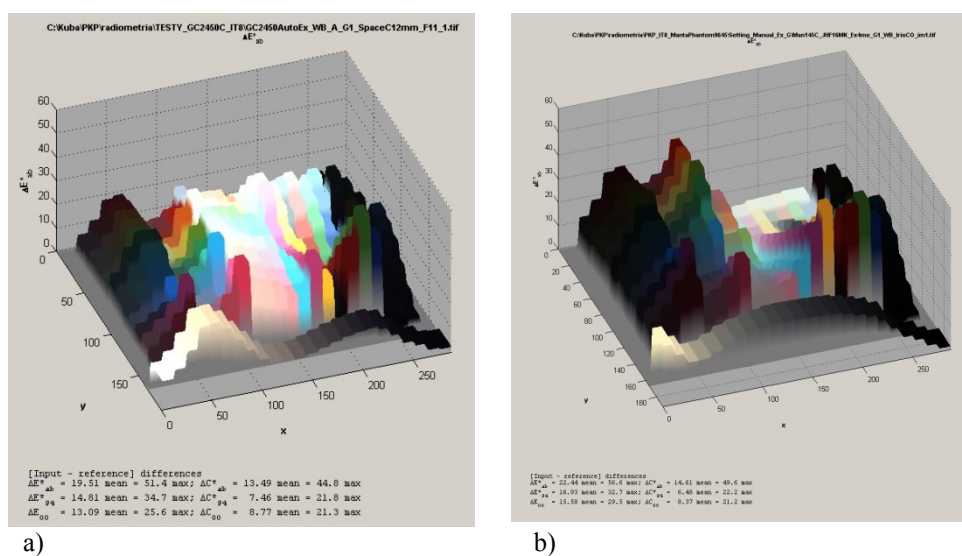


Rys. 2. Wykresy MTF kamer: Prosilica GC2450C/2450C a) i Manta G145 b) z obiektywem Tamron 8/1,4

Z wykresów zamieszczonych na rysunku 2 można odczytać, że na obrazie z kamery Prosilica krawędź definiuje 5 pikseli, co stanowi 1/375 wysokości zdjęcia w pikselach. Na obrazie z kamery Manta krawędź definiuje około 2,5 piksela, co stanowi 1/408 wysokości zdjęcia. Spadek ostrości o 50% dla kamery Prosilica następuje przy rozdzielczości

względnej 384 grubości linii w stosunku do wysokości matrycy, natomiast dla kamery Manta – 416 linii/wysokość matrycy. Wniosek: kamera Manta daje nieco ostrzejszy obraz.

Przykładem wyników testowania przenoszenia barw są wykresy przedstawione na rysunku 3 a i b. Różnice między barwami referencyjnymi na poszczególnych polach testu są przedstawione w postaci wartości odległości ΔE_{ab} w przestrzeni barw modelu L^*a^*b . Dla poniższego przykładu z wykresów można wnioskować, iż kamera Prosilica z obiektywem Pyxis 12 przy wybranych ustawieniach ekspozycji wykazuje bardziej wyrównane różnice w przenoszeniu barw niż kamera Manta z obiektywem JHF. Ta druga lepiej przenosi barwy o dużej jasności. Wartość średnia różnicy ΔE_{ab} jest dla tej kamery większa. Wniosek: dla tych konkretnych warunków eksperymentu kamera Prosilica lepiej odwzorowuje barwy.



Rys. 3. Wykresy różnic odległości ΔE_{ab} w przestrzeni L^*a^*b między barwami referencyjnymi testu, a barwami na obrazie: z kamery Prosilica GC2450C/2450C z obiektywem Pyxis 12 mm a) i Kamery Manta z obiektywem JHF 16 mm b)

6. PODSUMOWANIE

Sensory wizyjne wykorzystywane w systemach do pomiaru skrajni kolejowej opartych na metodzie fotogrametrycznej i metodzie profili świetlnych, dla zapewnienia wysokiej dokładności pomiaru powinna charakteryzować możliwie duża rozdzielczość geometryczna oraz starannie przeprowadzona kalibracja. Szczególnie należy zwrócić uwagę na minimalizację błędów szcztąkowych dystorsji obiektywu w pobliżu rejonów skrajnych formatu, bo jest to obszar roboczy zdjęć w tej aplikacji.

Ze względu na pracę w skrajnych warunkach oświetleniowych sensory wykorzystane w systemach fotogrametrycznych i skanujących laserem (LIDAR) powinny charakteryzować się dużym zakresem dynamicznym i tonalnym oraz dobrym kontrastem. Ze względu na duże wymagania co do jakości radiometrycznej preferowane są tu sensory z matrycą CCD.

Sensory wykorzystywane do tekstuowania chmury punktów powinny dobrze przenosić barwy.

Kamery użyte w systemach z profilami świetlnymi powinny cechować dużą częstotliwość akwizycji. Preferowane jest użycie interfejsu CameraLink. Ten rodzaj interfejsu jest również zalecany tam, gdzie konieczna jest bardzo dokładna synchronizacja części składowych systemu, a więc w systemach fotogrametrycznych. Sensory o znaczeniu uzupełniającym służące np. do tekstuowania mogą wykorzystywać interfejsy GigE lub Fire Wire.

7. LITERATURA

Bayoud F. A., *Development of a Robotic Mobile Mapping System by Vision-Aided Inertial Navigation: A Geomatics Approach*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerischen Geodätischen Kommission, 2006.

Brown D., *Close Range Camera Calibration*, Photogrammetric Engineering 37(8), s. 855–866, 1971.

Griessbach D., Baumbach D., Zuev S., *Vision Aided Inertial Navigation*, EUROCow 2010, Castelldefels, Hiszpania, 2010.

Grün A., Huang T. S., *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2001.

Habib A., Kersting A., Kim C., Chow J., *Impact of Camera and System Calibration on Photogrammetric Reconstruction Using Medium Format Digital Camera*, EUROCow 2010, Castelldefels, Hiszpania, 2010.

Kolecki J., Iwaszczuk D., Stilla U., *Calibration of an IR System for Automatic Texturing of 3D Building Models by Direct Geo-referenced Images*, EUROCow 2010, Castelldefels, Hiszpania, 2010.

Pirowski T., Tokarczyk R., 2006. Badanie przestrzeni barwnej cyfrowego aparatu fotograficznego na przykładzie Minolty Dynax 5D. *Zeszyty Naukowe AGH, Półrocznik Geodezja*, Tom 12, Zeszyt 2/1.

Vision Research <http://www.visionresearch.com/Products/High-Speed-Cameras/v91/>

Zhang Z., *Flexible Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations*, ICCV99, 1999.

VISION SENSORS IN RAILWAY CLEARANCE MEASUREMENT SYSTEMS AND ANALYSIS OF THEIR SELECTION METHODS

KEY WORDS: railway clearance, digital camera, camera calibration, radiometric calibration

SUMMARY: The characteristics of imaging systems used in railway clearance measurements can be divided into three groups: geometry of projection, radiometric quality and technical specifications. The geometry of image acquisition is determined in the camera calibration procedure. The interior orientation parameters of camera and distortion model parameters of a lens as well as an imaging sensor are estimated using special test-fields. The radiometric calibration and testing often involves the determination of the imaging system resolution, sharpness and contrast characteristics (MTF or SFR functions and gamma), dynamic range, noise and color projection accuracy. The process of image acquisition can be characterized by frequency and baud rate. The subsequent, widely used wire and wireless communication interfaces of currently used cameras are going to be compared: GiGE, CameraLink, USB, FireWire. The short deprecation of influence of applied interface on the baud rate,

systems topology, wire lengths, processor load and the maximum number of connected imagine devices will be given.

Within the conducted researches the few appropriate for the railway measurements cameras were tested. The examined cameras have various communication interfaces and were used with various lenses. The results of geometric calibration and radiometric testing will be given. The multi-variant camera calibration allowed to address the following problems:

- what we can say about the quantitative characteristics of imagine errors depending on the lens used,
- is the modeling of the radial distortion only sufficient and how many coefficients should be applied,
- how big are the remaining residuals after applying the systematic image error corrections.

The radiometric investigations was conducted using the IT8 and SFR Plus tests. The Imatest software was used. The most important features for the railway clearance measurements were examined, i.e. sharpness, contrast, dynamic range and color projection quality. As a result of conducted researches the set of important for the choice of imaging system features was determined.

Dr hab. inż. Regina Tokarczyk, prof. AGH
e-mail: tokarcz@agh.edu.pl
telefon: 12 617 2288

Mgr inż. Jakub Kolecki
e-mail: kolecki@agh.edu.pl
telefon: 12 617 3993

Dr inż. Piotr Kohut
e-mail: pko@agh.edu.pl
telefon: 12 617 3396