

## POZYSKIWANIE INFORMACJI PRZESTRZENNEJ Z WYKORZYSTANIEM METODY PRZESTRZENNO- -CZASOWEGO KADROWANIA OBRAZÓW

### ACQUISITION OF SPATIAL INFORMATION WITH THE USE OF SPATIO-TEMPORAL IMAGE FRAMING

Marek Piszczek, Krzysztof Rutyna

Instytut Optoelektroniki, Wojskowa Akademia Techniczna

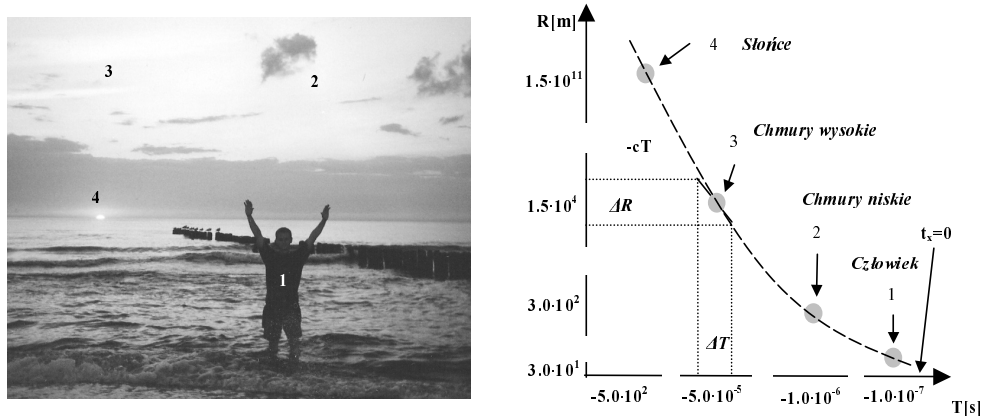
**Słowa kluczowe:** szybka fotografia, podświetlenie laserowe, fotografia laserowa  
Keywords: high speed photography, laser illumination, active imaging

## Wprowadzenie

Jednym z istotnych naukowych problemów jest poszukiwanie efektywnych metod pomiarowych umożliwiających akwizycję danych przestrzennych. Na potrzeby systemów geoinformacyjnych wykorzystuje się do tego celu pomiary terenowe, zdjęcia lotnicze i satelitarne, a także skanowanie laserowe. Oczywiście poszukuje się również nowych rozwiązań m.in. z zakresu „szybkiej techniki obrazowej”. Prezentowane w opracowaniu rozwiązanie do pozyskiwania danych przestrzennych wykorzystuje metodę tzw. kadrowania przestrzenno-czasowego. Proponowana optoelektroniczna metoda rejestracji obrazów oparta jest na wykorzystaniu aktywnego laserowego podświetlenia.

Kluczowym elementem wielu stosowanych obecnie technologii związanych z obrazowaniem są tzw. parametry charakterystyczne metody. To one w głównej mierze decydują o możliwościach pomiarowych i potencjalnym przeznaczeniu metody pomiarowej (Vishnevsky i in., 1999). W proponowanym rozwiązaniu tymi parametrami charakterystycznymi są: sposób oświetlenia sceny (krótco-czasowe impulsy laserowe  $t_0 \sim 10^{-8}$  s) oraz stosowana metoda detekcji promieniowania (szybka migawka  $t_D \sim 10^{-8}$  s). Funkcjonowanie metody oparte jest na precyzyjnym doborze odpowiednich relacji czasowych między emitowaną i odbieraną wiązką fali E-M propagującą się w przestrzeni pomiarowej z prędkością  $c \sim 3 \times 10^8$  m/s. Z podstawowej zależności  $R=c \times T$  wiążącej przebytą drogę  $R$  wiązki pomiarowej w funkcji czasu  $T$ , jednoznacznie wynika (co potwierdza wiele innych metod pomiarowych), że istnieje możliwość rejestracji informacji obrazowej ze ściśle określonego fragmentu przestrzeni i w ściśle określonym przedziale czasowym. Fakt wykorzystywania promieniowania laserowego oraz ściślej zależności czasu i przestrzeni obrazowania legł u podstaw nazewnictwa proponowanej metody jako kadrowanie przestrzenno-czasowe, fotografia laserowa, metoda aktywnego podświetlenia lub po prostu metoda R-T.

Aby lepiej zrozumieć ideę kadrowania przestrzenno-czasowego można się posłużyć przykładem przedstawionym na rysunku 1.



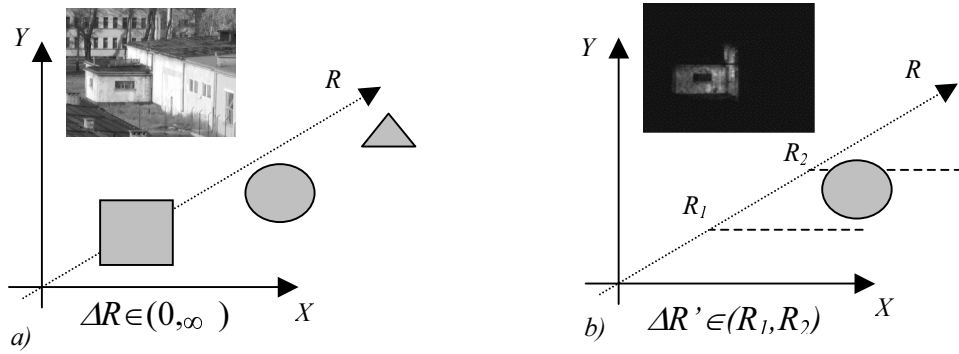
Rys. 1. Interpretacja obowiązujących relacji przestrzennych i czasowych na zdjęciu „Zachód słońca”

Typowe zdjęcie wykonane przy użyciu klasycznego aparatu fotograficznego prezentujące m.in. zachód słońca może w bardzo prosty sposób wyjaśnić problem czasu i przestrzeni obrazowania. Zidentyfikowane na zdjęciu obiekty (1,2,3, ...) pochodzą z bardzo szerokiego tzw. kadru przestrzenno-czasowego tzn. ich rozpiętość w sensie przestrzeni i czasu obrazowania np. pomiędzy postacią zarejestrowaną na zdjęciu oraz tarczą zachodzącego słońca jest bardzo duża i wynosi odpowiednio  $\Delta R \sim 1,5 \times 10^{11}$  m,  $\Delta T \sim 5,0 \times 10^2$  s. Są to oczywiście klasyczne własności tradycyjnej fotografii, ale jednocześnie stanowią one pewien problem dla specyficznych zastosowań pomiarowych, a dotyczących możliwości pozyskiwania informacji selektywnej w sensie przestrzennym. Przedstawione powyżej rozważania nasuwają oczywiście pytanie czy w związku z tym istnieje możliwość zawężenia tzw. horyzontu czasowego i przestrzennego możliwego do zarejestrowania na pojedynczym zdjęciu. Okazuje się, że istnieją już na rynku technologie optoelektroniczne (Elbit, 2006; Gawlikowski i in., 2002), które umożliwiają realizację tego zadania.

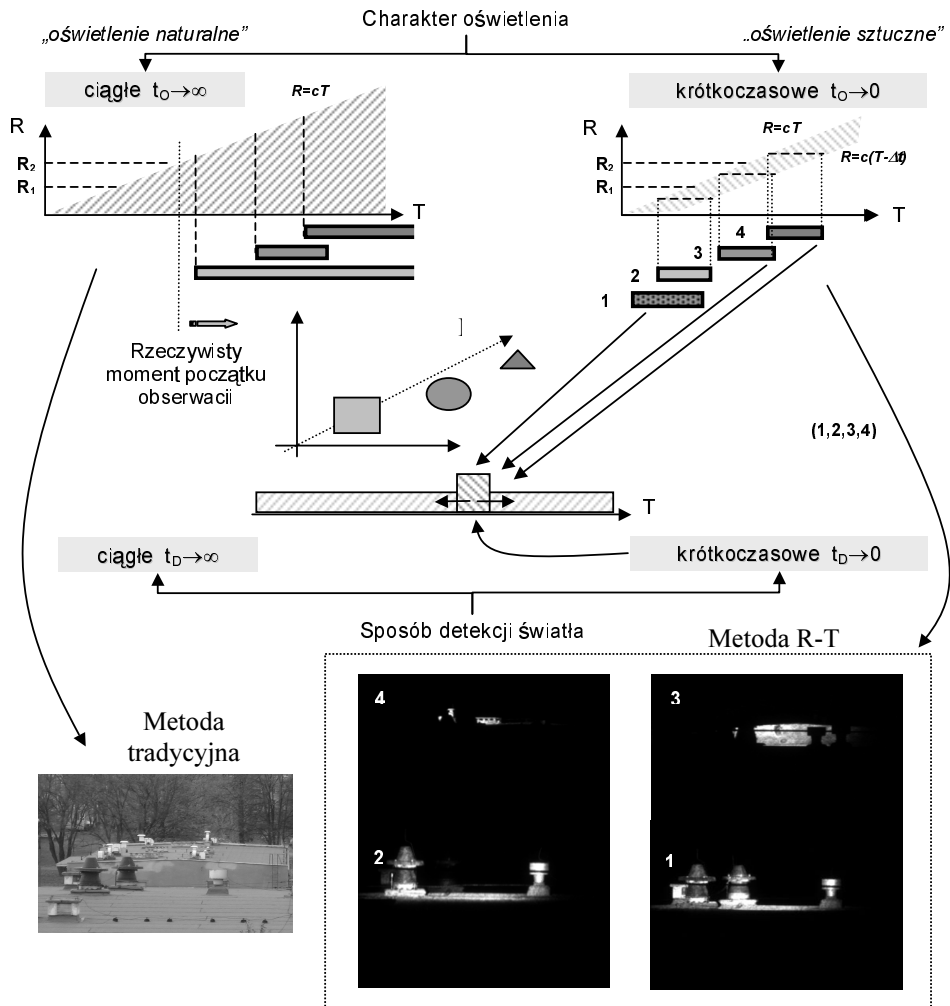
## Metoda kadrowania przestrzenno-czasowego

Klasyczna fotografia bardzo ogólnie traktuje kwestię przestrzeni i czasu obrazowania. Informacja obrazowa zarejestrowana w pojedynczym kadrze stanowi pewien sposób uchwycenia fragmentu przestrzeni  $R^3$  w chwili czasowej  $T$  (mało precyzyjnie określonej z punktu widzenia pomiarowego). Główna uwaga koncentruje się na samej możliwości akwizycji scenarii będącej wynikiem rzutowania przestrzeni  $R^3$  (ograniczonej jedynie kątowym polem widzenia optyki) na płaszczyznę obrazową rejestratora optycznego. Z punktu widzenia m.in. systemów informacji przestrzennej cenną własnością byłaby umiejętność wpływania na obserwowaną przestrzeń w znacznie szerszym zakresie np. poprzez możliwość ustalania głębokości  $\Delta R = R_2 - R_1$  i odległości  $R_1$  do rejestrowanego fragmentu obserwowanej scenarii (rys. 2).

Proponowane rozwiązanie umożliwia właśnie realizację tak zdefiniowanego zadania. Aby jednak wyjaśnić kwestię pewnych różnic między „tradycyjną” fotografią a kadrowaniem przestrzenno-czasowym należy szczegółowiej przyjrzeć się wybranym kwestiom dotyczącym charakteru oświetlenia i sposobom detekcji wykorzystywanym w systemach akwizycji obrazów (rys. 3).



Rys. 2. Porównanie fotografii tradycyjnej a), i przestrzenno-czasowej b)

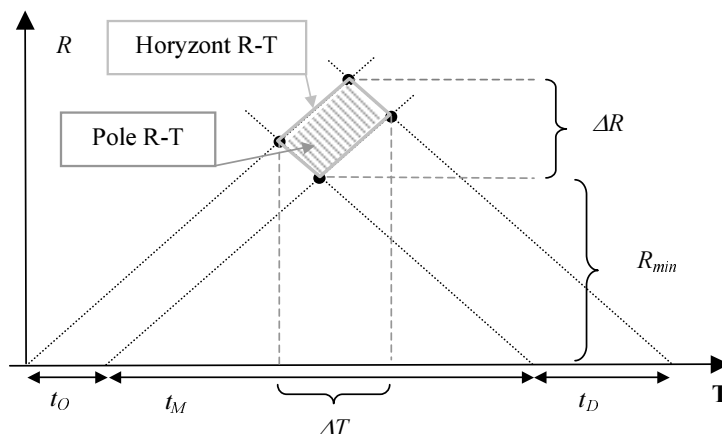


Rys. 3. Wpływ oświetlenia i czasu detekcji na rejestrowany obraz

Po lewej stronie rysunku 3 przedstawiono relacje przestrzenno-czasowe, charakterystyczne parametry i przykład zobrazowania typowy dla fotografii klasycznej, natomiast po prawej – dla fotografii laserowej. W tradycyjnej fotografii wykorzystywane jest najczęściej oświetlenie naturalne bądź sztuczne o charakterze ciągłym lub quasi-ciągłym. Moment detekcji promieniowania nie odgrywa w takim przypadku istotnego znaczenia. Oczywiście wykorzystanie np. lampy błyskowej wymaga synchronicznej pracy układu oświetlacz-detektor jednak obowiązujące relacje czasowe w całym procesie akwizycji (np. czas detekcji promieniowania tzw. migawka  $t_D > 10^{-5}$ ) są o kilka rzędów większe niż te przewidziane dla metody aktywnego podświetlania.

### Aspekt czasowy metody kadrowania przestrzenno-czasowego

W odróżnieniu od klasycznej fotografii, metoda kadrowania przestrzenno-czasowego wykorzystuje skrajnie krótkie czasy oświetlenia i detekcji ( $t_O \rightarrow 0$ ,  $t_D \rightarrow 0$ ) na poziomie  $10^{-8}$ s, oraz wymaga stosowania odpowiednich sekwencji czasowych  $t_O$ - $t_M$ - $t_D$  do sterowania procesem pomiarowym (gdzie:  $t_M$  – jest czasem wyczekiwania), celem uzyskania wymaganego tzw. horyzontu przestrzenno-czasowego (Piszczek i in., 2006), który opisuje diagram R-T przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Notacja graficzna wyjaśniająca sposób kadrowania przestrzennego – diagram metody R-T

Na podstawie znajomości wartości parametrów  $t_O$ ,  $t_M$ ,  $t_D$  można określić podstawowe parametry czasowe i przestrzenne ( $\Delta T$ ,  $R_{min}$ ,  $\Delta R$ ) istotne z pomiarowego punktu widzenia:

- przedział czasowy rejestrowanych zdarzeń

$$\Delta T = 0,5 (t_p + t_O) \quad (1)$$

- odległość do pola obserwacji

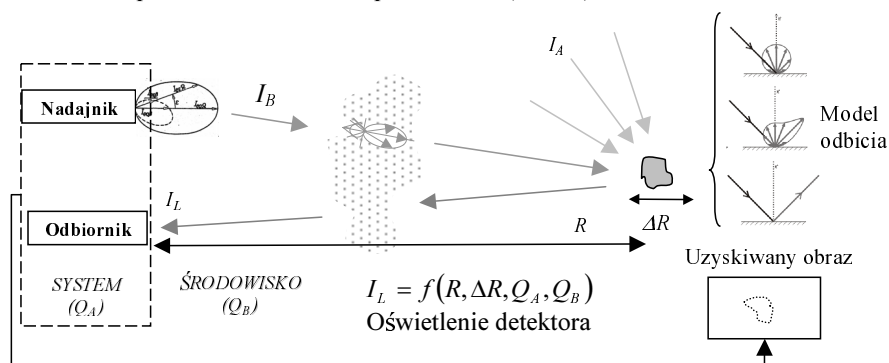
$$R_{min} = 0,5ct_M \quad (2)$$

- głębokość pola obserwacji

$$\Delta R = 0,5c (t_D + t_O) \quad (3)$$

### Aspekt radiometryczny metody kadrowania przestrzenno-czasowego

Istotną rolę z punktu widzenia realizowalności fizycznej metody odgrywa nie tylko dobór odpowiednich parametrów czasowych, ale i odpowiednia selekcja widmowa składowych promieniowania docierającego do odbiornika w czasie akwizycji sygnału  $I_L$ . O jakości uzyskiwanych obrazów metodą R-T (rys. 5) decydować będzie konfiguracja układu nadawczo-odbiorczego (zestaw kluczowych parametrów systemowych  $Q_A$ ) wykonana na podstawie analizy radiometrycznej „modelu propagacji” (z parametrami  $Q_B$ ) uwzględniającego dane środowiskowe i położenie obiektu w przestrzeni ( $R, DR$ ).



Rys. 5. Model propagacji dla metody T-R

Na diagramie czasowym metody R-T przedstawionym na rysunku 4 (dla uproszczenia) przyjęto założenie, że w procesie akwizycji mamy do czynienia tylko z impulsowym laserowym podświetleniem  $I_B$ . Jednak w rzeczywistych warunkach pomiarowych występuje też oświetlenie naturalne  $I_A$ , które w sensie pomiarowym jest istotnym czynnikiem zakłócającym. Minimalizację ww. zakłócenia uzyskujemy poprzez stosowanie oświetlenia o wąskiej szerokości spektralnej  $\Delta\lambda$  (źródło laserowe) i odpowiedniej filtracji widmowej po stronie odbiorczej (dopasowanej do źródła oświetlającego). Ze względu na dużą selektywność  $\Delta\lambda$  promieniowania docierającego do detektora, dominującą rolę w procesie powstawania obrazu odgrywa składowa  $I_B$ . W związku z tym udział ww. składowych można opisać ogólną zależnością (4).

$$I_L \propto \int_0^{\infty} \int_{\Delta\lambda} I_A(R, \lambda) dR d\lambda + \int_{\Delta R} \int_{\Delta\lambda} I_B(R, \lambda) dR d\lambda \quad (4)$$

### Modelowanie i symulacje metody kadrowania przestrzenno-czasowego

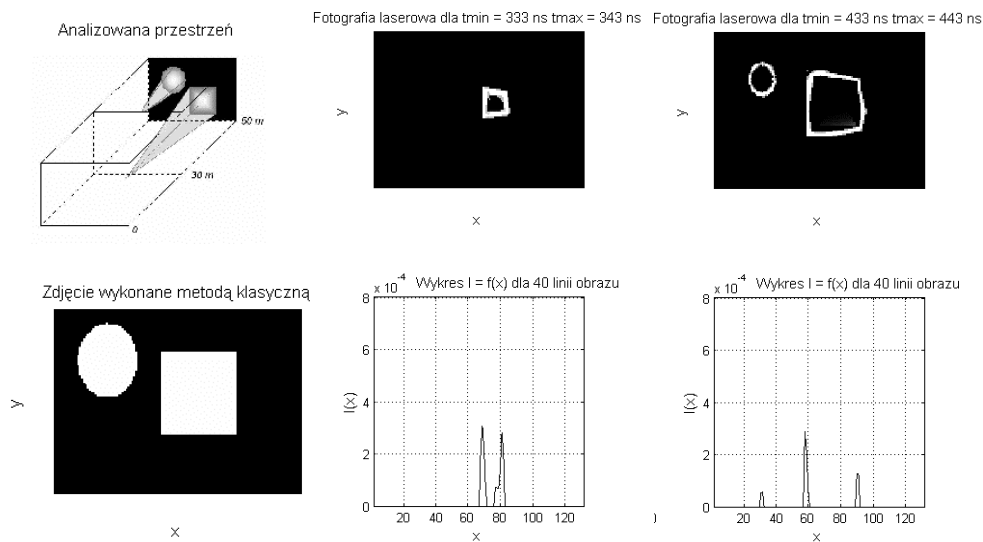
Celem dokonania wstępnej weryfikacji poprawności działania metody selektywnego obrazowania przestrzeni autorzy opracowali odpowiedni program symulacyjny, dzięki któremu istnieje możliwość syntezy zobrazowań zbliżonych do tych, jakie uzyskiwano w funkcjonującym modelu fizycznym. Dzięki wykorzystaniu danych z pakietu programów PcEOSAEL firmy ONTAR istnieje możliwość swobodnego tworzenia scenariuszy pomiarowych uwzględniających wpływ warunków atmosferycznych i klimatycznych.

Symulator został podzielony na współpracujące ze sobą bloki umożliwiające ustalenie m.in. parametrów systemowych  $Q_A$  i środowiskowych  $Q_B$  poprzez:

- wprowadzenie geometrii symulowanej przestrzeni tzw. obserwowana sceneria,
- wprowadzenie warunków atmosferycznych i klimatycznych w kilku strefach pomiarowych symulowanej przestrzeni,
- ustalenie parametrów symulacji (np. krok czasowy symulacji, rozkład wiązki oświetlającej),
- ustalenie parametrów akwizycji (np. czas trwania migawki  $t_D$ , czułość detektora).

Na rysunku 6 w sposób graficzny przedstawiono porównanie wyników modelowania procesu rejestracji obrazów metodą klasyczną i selektywnego obrazowania przestrzeni. Wirtualnej przestrzeni zostały umieszczone obiekty testowe. Dla różnych parametrów pracy systemu  $t_O-t_M-t_D \rightarrow (t_{min}-t_{max})$  na podstawie analizy wyników symulacyjnych zostały zsyntezowane kadry przedstawiające widoczność grupy obiektów występujących w analizowanej przestrzeni.

Trwające prace nad kolejnymi wersjami symulatora dla metody aktywnego podświetlania mają na celu ocenę „zachowania się” systemu pomiarowego w różnych sytuacjach pomiarowych i przygotowania odpowiedniego oprogramowania nadzorującego funkcjonowanie takiego systemu.

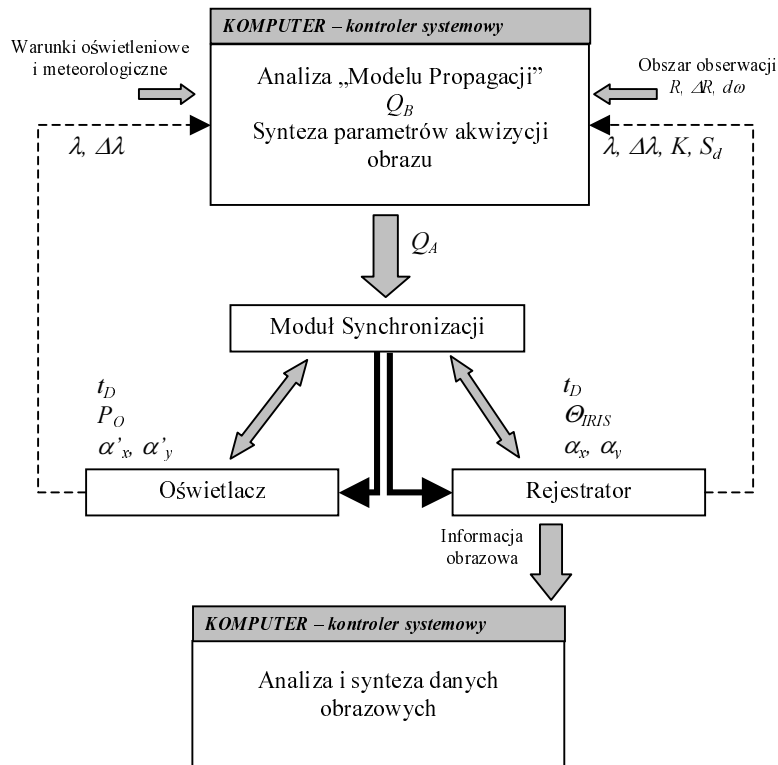


Rys. 6. Przykładowe wyniki symulacji dla metody kadrowania przestrzenno-czasowego

## Model funkcjonowania kadrowania przestrzenno-czasowego

Scenariusze wykorzystania metody kadrowania przestrzenno-czasowego mogą być bardzo zróżnicowane jednak można przedstawić pewną ogólną procedurę (model) funkcjonowania takiego systemu opartego na omawianej metodzie (rys. 7), która obejmuje m.in.:

- 1) oszacowanie potencjalnego obszaru obserwacji – kątowe pole widzenia i zasięg ( $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $R$ ,  $\Delta R$ ),

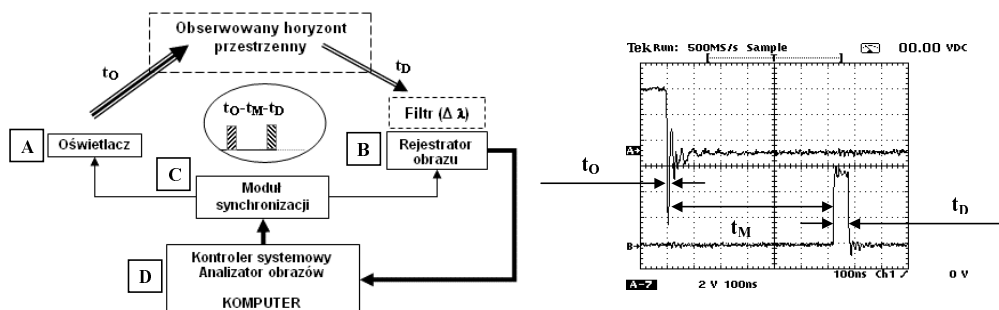


Rys. 7. Model funkcjonowania systemu – procedura pomiarowa

- 2) przeprowadzenie pomiarów kalibracyjnych celem określenia współczynników modelu propagacji  $Q_B$  dla obserwowanej sceny,
- 3) wyznaczenie profilu czasowego (przestrzennego) oświetlenia  $I_L = f(R)$ ,
- 4) dobór parametrów systemowych  $Q_A = f(R, \Delta R, d\omega)$  dla procesu akwizycji obrazów,
- 5) właściwe skanowanie przestrzeni  $\rightarrow$  seria kadrów dla różnych parametrów przestrzennych,
- 6) przetwarzanie obrazów (kadrów) „maksymalizacji kontrastu”,
- 7) analiza i synteza/wizualizacja informacji obrazowej.

## Stanowisko badawcze

Metoda selektywnego obrazowania przestrzeni wykorzystuje odpowiednie sekwencje czasowe (ustawiane przez kontroler systemowy) do sterowania poszczególnymi blokami systemu pomiarowego (oświetlacz, rejestrator obrazu, moduł synchronizacji). Schemat blokowy oraz podstawowe przebiegi czasowe opracowanego systemu akwizycji przetwarzania i analizy danych realizującego metodę selektywnego obrazowania przestrzeni przedstawiono na rysunku 8.

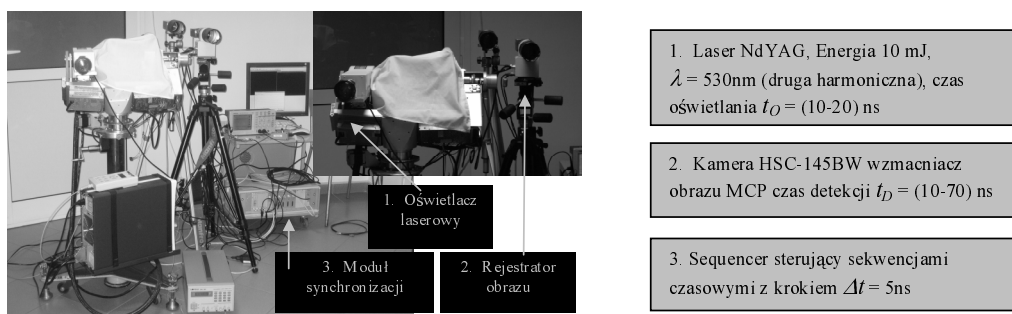


Rys. 8. Schemat blokowy i przebiegi czasowe systemu obserwacyjno-pomiarowego

Kluczowymi elementami systemu są:

- 1) oświetlacz laserowy z regulowanymi parametrami czasowymi i energetycznymi oraz modyfikowaną charakterystyką kątową oświetlanej sceny zależną od kąтового pola widzenia modułu detekcyjnego,
- 2) rejestrator obrazu z regulowaną optyką, modulem filtracji widmowej dostosowanym pod względem własności spektralnych do oświetlacza oraz sterowanym wzmacniaczem obrazu (MCP) pełniącym jednocześnie funkcję szybkiej migawki.

Ogólny widok oraz podstawowe parametry opracowanego systemu laboratoryjnego działającego wg metody T-R zostały zamieszczone na rysunku 9.



Rys. 9. Laboracyjny system pomiarowy i jego parametry

## Wyniki pomiarów

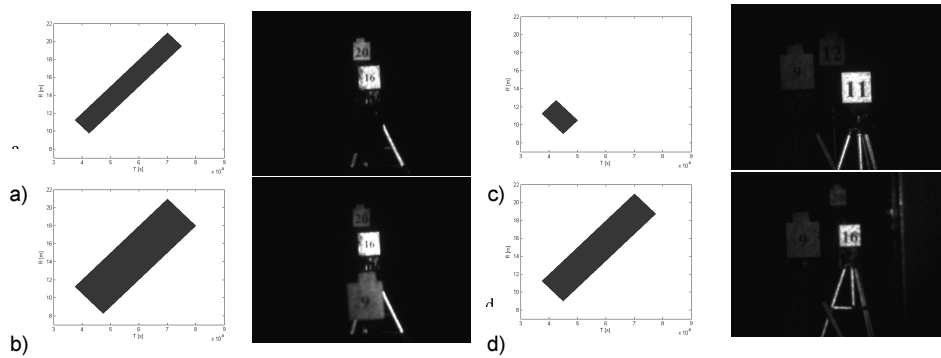
Testowanie opracowanego stanowiska laboratoryjnego miało charakter badań krótko- i długozasięgowych. Weryfikacja systemu i metody na niewielkich dystansach ( $< 45\text{m}$ ) odbywała się w pomieszczeniach laboratoryjnych. Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu czasu oświetlania  $t_0$  oraz czasu detekcji  $t_D$  na rejestrowane obrazy. W przestrzeni pomiarowej na odpowiednich odległościach zostały umieszczone znaczniki pomiarowe. Sterując polem kadru przestrzenno-czasowego, (co przedstawiono na diagramach R-T) uzyskano obrazy prezentujące odpowiednie fragmenty obserwowanej przestrzeni (rys. 10), na których przedstawiono znaczniki pomiarowe (liczby na białym tle wskazują odległość od punktu obserwacji wyrażoną w metrach). Dane pomiarowe zawarto w tabeli.



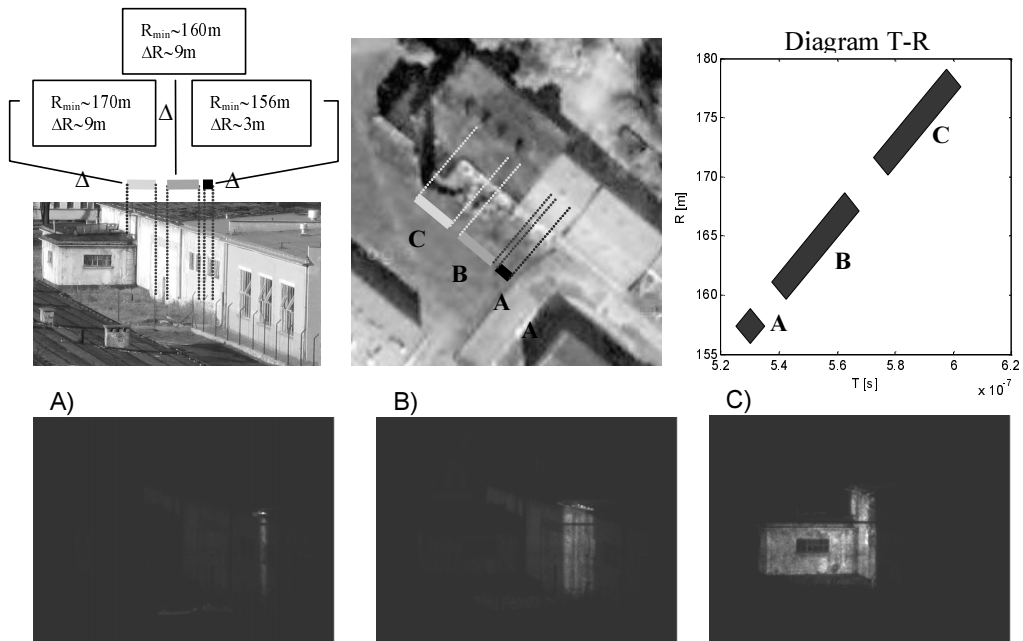
Badania długodystansowe przeprowadzono na terenie Wojskowej Akademii Technicznej, a ich wyniki zamieszczono na rysunku 11. Uzyskane rezultaty pozytywnie zweryfikowały poprawność opisu zależności przestrzenno-czasowych diagramem R-T.

Tabela

Kadr	$t_O$ [ns]	$t_M$ [ns]	$t_D$ [ns]	$R_{min}$ [m]	$\Delta R$ [m]
a	10	65	65	9,7	11,2
b	20	55	65	8,2	12,7
c	15	75	10	9	3,7
d	15	75	65	9	12



Rys. 10. Wyniki testowania wpływu czasu oświetlania a)  $t_O=10$  ns, b)  $t_O=20$  ns i czasu detekcji c)  $t_D=10$  ns, d)  $t_D=65$  ns

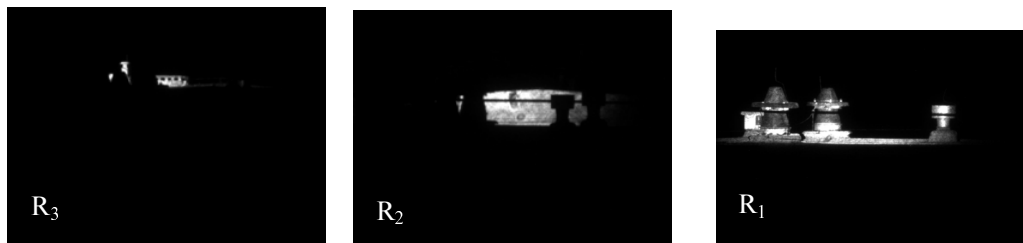


Rys. 11. Przykład selektywnego kadrowania przestrzeni uzyskany podczas testów długodystansowych

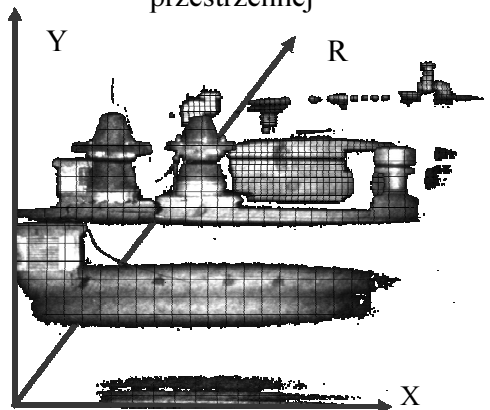
Już wstępne badania potwierdziły również, że metoda (przy zastosowaniu zaawansowanego przetwarzania zorientowanego przestrzennie) może znaleźć zastosowanie w modelowaniu geometrii zarówno małogabarytowych obiektów jak i dużych przestrzeni przy jednoczesnym zachowaniu dużej selektywności obrazowania przestrzennego.

Kadrowanie przestrzenno-czasowe oferuje duże możliwości w zakresie analizy danych (np. autosegmentacja obiektów przestrzennych) i syntezy różnego typu zobrażeń (w tym zobrażeń 3D), co przedstawiono na rysunku 12 (Cyganek, 2002). Kolejną szczególną własnością metody R-T jest możliwość automatycznego pozyskiwanie informacji o elementach geometrii obserwowanych obiektów zarówno pod kątem ich oceny wizualnej jak i komputerowego procesu wymiarowania.

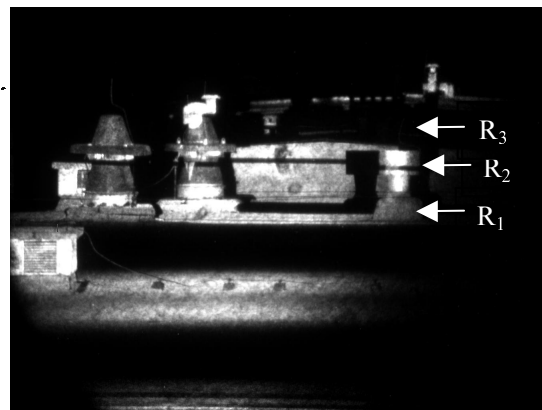
### Autosegmentacja obiektów dla selektywnych obserwacji przestrzennych



### Synteza struktury przestrzennej



### Synteza widoku klasycznego



Rys. 12. Przykład analizy i zobrazowania danych

## Podsumowanie

Metoda kadrowania przestrzenno-czasowego wykorzystująca aktywne (laserowe) podświetlanie stanowi nowatorską metodę pozyskiwania informacji obrazowej. Umożliwia rejestrację obrazów z zachowaniem selektywności przestrzennej i czasowej przy jednoczesnej poprawie jakości uzyskiwanych zobrażeń. Przeprowadzone symulacje procesu selektywnego zobrazowania przestrzeni, z uwzględnieniem różnych warunków atmosferycznych i klimatycznych, pozytywnie zweryfikowały ideę metody pomiarowej. Testy komputerowe według zaproponowanych scenariuszy klimatycznych dla zadanych parametrów: oświetlacza, odległości do obiektu, czasu migawki czy czułości detektora, potwierdziły możliwość sterowania kadrem czasoprzestrzennym do obserwacji dowolnie wybranego fragmentu przestrzeni  $R^3$ . Natomiast analiza tych symulacji, potwierdzająca wyniki eksperymentalne, wskazała na potencjalne możliwości wyeksponowania obiektów niewidocznych dla klasycznych przyrządów o ciągłej lub quasi-ciągłej rejestracji czasowej. Znajomość własności optycznych układu obrazującego w powiązaniu z danymi o odległości i głębokości pola obserwacji ( $R_{min}, \Delta R$ ) umożliwia opracowanie danych pomiarowych, w wyniku których możliwe jest syntezyzowanie zobrażeń 3D oraz zautomatyzowany (komputerowy) pomiar geometrii obiektów. Należy sądzić, iż aplikacje oparte na proponowanej metodzie stać się mogą cennym narzędziem pomiarowym uzupełniającym istniejące rozwiązania w zakresie pozyskiwania danych dla systemów informacji przestrzennej. Analizy teoretyczne oraz wyniki eksperymentalne wskazują na następujące potencjalne możliwości zastosowania metody kadrowania przestrzenno-czasowego:

- selekcja przestrzenna elementów obserwowanej sceny,
- rejestracja i analiza zjawisk (procesów) szybkozmiennych,
- wykrywanie i identyfikacja obiektów przy obserwacjach w niekorzystnych warunkach oświetlenia i/lub widoczności.

## Literatura

- Cyganek B., 2002: Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa.
- Elbit, 2006: Laserowe pompowanie obrazu, Raport – Wojsko Technika Obronność, 04/05.
- Gawlikowski A., Marczak J., Mierczyk Z., Młodzianko A., Ostrowski R., Zygmunt M., 2002: Wojskowe dalmierze laserowe, *Biuletyn WAT*, Vol. LI, Nr 6, s. 21-63, Warszawa.
- Piszczek M., Rutyna K., Szustakowski M., 2006: Koncepcja systemu fotografii laserowej do identyfikacji obiektów w warunkach słabego oświetlenia, IX Konferencja Naukowa COE-2006, s. 51-55. Zakopane.
- Vishnevsky G. et al., 1999: Development and investigation of the digital EBCCD camera with 1024X512 format frame-transfer EBCCD image tubes, *Proceedings of SPIE Volume: 3901 Photonics for Transportation*, pp. 137-143.

## Abstract

*In the paper, the method of spatio-temporal framing of images (photos) with the use of active (laser) highlighting was presented. Attention is drawn both to the temporal and radiometric aspects. In the authors' opinion, this is a novelty method of acquiring image information. It makes registration possible maintaining spatial and temporal selectivity. At the same time, an improvement in quality of obtained images is possible.*

*In the paper, results of simulation of the process of selective space imaging is presented, taking into account different atmospheric and climatic conditions. Computer test were carried out according to suggested climate scenarios for the parameters assigned: lighting, distance from the object, shutter time or sensitivity of the detector. Results of theoretical analysis were verified by experimental research. The possibility to steer spatio-temporal framing for observation of any voluntarily selected fragment of the space  $R^3$  was confirmed.*

*In addition, this method allows exposing objects invisible for classical instruments with continuous or quasi-continuous temporal registration. Taking into account optical parameters of the imaging system (camera) in connection with data on distance and depth of the observation field ( $R_{min}, \Delta R$ ), this method makes automatic measurement of the geometry of the objects observed possible.*

*We reckon that the applications based on the proposed method may become a valuable measuring instrument supplementing existing solutions with regard to acquisition of data for Spatial Information Systems.*

*Theoretical analyses and experimental results point to the following potential areas of applicability of this method:*

- *Selection of spatial elements of the scene observed,*
- *Registration and analysis of fast changing phenomena (processes),*
- *Discovering and identification of objects in observations performed in unfavourable lighting and/or visibility conditions.*

dr inż. Marek Piszczek  
piszczek@wat.edu.pl

dr inż. Krzysztof Rutyna  
krutyna@wat.edu.pl