AUTOMATYKA • 2005 • Tom 9 • Zeszyt 3

Krzysztof Chrzanowski*, Tomasz Raźniewski**

Symulacja komputerowa w szkoleniu operatorów kamer termowizyjnych

1. Wprowadzenie

Kamery termowizyjne umożliwiają prowadzenie skutecznej obserwacji w nocy oraz trudnych warunkach obserwacji. Stanowią obecnie standardowe wyposażenie wojska, funkcjonariuszy straży granicznej, służby celnej i policji.

Efektywność użycia kamer termowizyjnych zależy w dużym stopniu od poziomu wyszkolenia ich operatorów. Proces szkolenia operatorów kamer termowizyjnych jest wielokrotnie dłuższy i trudniejszy od procesu szkolenia klasycznych przyrządów obserwacyjnych (celowniki optyczne, przyrządy noktowizyjne i kamery CCD/CMOS) z kilku przyczyn.

Po pierwsze, ze względu na inny zakres widmowy występują bardzo silne różnice pomiędzy obrazem termalnym generowanym przez kamery termowizyjne a obrazem generowanym przez zmysł wzroku człowieka oraz przez klasyczne przyrządy obserwacyjne. Po drugie, kamery termowizyjne nie umożliwiają widzenia stereoskopowego jak oczy człowieka, lornetki, niektóre gogle noktowizyjne i trudno jest ocenić prawidłowo odległość do obserwowanego obiektu na podstawie obrazu termalnego. Po trzecie, w obrazie termalnym brak jest cienia, nawet wtedy, kiedy sceneria jest oświetlona przez słońce czy księżyc. Po czwarte, szkolenie operatorów kamer termowizyjnych jest kosztowne, z uwagi na wysoką cenę zużywalnych bloków tych przyrządów, co stwarza ograniczenia na czas szkoleń.

Wszystkie ww. przyczyny powodują często sytuację, że początkujący operator widzi w nocy pewne obiekty, ale nie jest w stanie określić, co to są za obiekty, jaka jest odległość do nich, oraz traci generalnie poczucie orientacji przestrzennej. W tej sytuacji komputerowe symulatory kamer termowizyjnych stają się niejako naturalnym rozwiązaniem problemów związanych z osiągnięciem wymaganego poziomu wyszkolenia przez operatorów kamer termowizyjnych.

Ze względu na silne potrzeby wojskowe, w przeciągu ostatniej dekady opracowano szereg komputerowych symulatorów do szkolenia użytkowników optoelektronicznych urządzeń obserwacyjnych; m.in. do szkolenia użytkowników kamer termowizyjnych [1–12]. Opraco-

* Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa; kch@inframet.com
** Wyższa Szkoła Humanistyczno-Ekonomiczna, Łódź; traźniewski@inframet.com

wane symulatory umożliwiają dynamiczną generację trójwymiarowych widzialnych lub termalnych obrazów szeregu obiektów w różnych sceneriach.

Symulatory te mają jednak dwie podstawowe wady, które uniemożliwiają ich szerokie wykorzystanie do szkolenia operatorów kamer termowizyjnych.

Pierwsza wada to wysoka cena tych dynamicznych 3D generatorów obrazów ze względu na wysokie wymagania dotyczące mocy obliczeniowej, użycie specjalizowanych procesorów graficznych oraz wysokie koszty wytworzenia tych specjalistycznych systemów hardware-software. Ta wysoka cena jest zwykle akceptowalna w przypadku trenażerów lotników, ale nie jest do przyjęcia w przypadku szkolenia żołnierzy wojsk lądowych oraz funkcjonariuszy straży granicznej, służb celnych czy policji.

Druga wada, to brak możliwości symulacji kamer o ściśle sprecyzowanych parametrach. Obecnie większość komercyjnych symulatorów generuje obrazy, które byłyby generowane przez pewną uniwersalną kamerę termowizyjną. Inne umożliwiają jedynie względną regulację podstawowych parametrów kamery.

W latach 2003–2004 autorzy zaprezentowali wstępne wyniki prac na komputerowym symulatorem kamer termowizyjnych o wysokim realizmie symulacji [13, 14]. W tym artykule autorzy prezentują bardziej dojrzałą i rozbudowaną wersję symulatora umożliwiającego zwiększenie efektywności i szybkości procesu szkolenia operatorów kamer termowizyjnych. Zaprezentowano również zarys wykorzystanego algorytmu przetwarzania obrazu.

2. Koncepcja symulatora

Koncepcja prezentowanego w tym artykule symulatora Simter opiera się na trzech założeniach.

Po pierwsze, w typowych zastosowaniach naziemnych kamer termowizyjnych w wojskach lądowych, straży granicznej i policji mamy do czynienia z obrazami prawie statycznymi. Prowadzona jest obserwacja obiektów względne dalekich i nawet jeżeli są to obiekty ruchome, to ich obrazy są to prawie statyczne.

Po drugie, efektywne szkolenie operatora wymaga symulacji realnej kamery wykorzystywanej przez tego operatora.

Po trzecie, głównym celem stosowania symulatora jest wykorzystanie w procesie szkolenia operatorów kamer termowizyjnych i symulator powinien być wyposażony w funkcje umożliwiające prowadzenie efektywnego i szybkiego szkolenia dużych grup osób.

Konsekwencją przyjęcia pierwszego założenia jest obniżenie wymagań dotyczących mocy obliczeniowej komputera, które są jednak wciąż powyżej poziomu oferowanego przez typowe komputery osobiste. Jeżeli przyjmiemy dodatkowe założenie upraszczające, że zamiast pojedynczego trójwymiarowego obiektu można wykorzystać kilka obrazów dwuwymiarowych, to symulacja procesu obserwacji staje się już możliwa z wykorzystaniem typowego PC.

Konsekwencją przyjęcia drugiego założenia jest położenie głównego nacisku w fazie opracowywania symulatora Simter na realizm symulacji sensora, czyli kamery termowizyjnej. Zdecydowano, że symulator musi umożliwić symulację zmian typowych mechanizmów regulacji (poziomu, wzmocnienia, pola widzenia, zoomu elektronicznego, polaryza-

cji obrazu, ogniskowanego) oraz zadawanie szeregu mierzalnych parametrów kamery: charakterystyki MRTD, charakterystyki MTF, rozdzielczości temperaturowej NETD, szumu przestrzennego FPN, liczby martwych pikseli oraz niejednorodności matrycy detektorów.

Konsekwencją przyjęcia trzeciego założenia jest konieczność umożliwienia pracy w sieci, wprowadzenie multimedialnego samouczka prezentującego zasady wykorzystania symulatora oraz modułu testowania poziomu wiedzy szkolonych.

3. Algorytm przetwarzania obrazu

Uzyskanie wysokiego realizmu symulacji możliwe jest jedynie w przypadku wykorzystania procesu przetwarzania obrazu symulowanych obiektów, który wiernie odwzorowuje realne zjawiska fizyczne zachodzące w realnym systemie obiekt-atmosfera-kamera-obserwator. Na podstawie eksperymentów przeprowadzonych z grami komputerowymi autorzy doszli do przekonania, że człowiek bardzo szybko zauważa, że obrazy generowane przez wiele gier oferujących tzw. „obrazy w podczerwieni" różnią się od obrazów generowanych przez realne kamery termowizyjne, ponieważ brakuje w nich szeregu zniekształceń obrazu powstałych na skutek różnych typów szumów kamery i ograniczonej rozdzielczości kamery. Z tych względów autorzy skoncentrowali się na problemie modelowania samej kamery, przykładając mniejszą wagę do modelowania obiektu.

Po przeprowadzeniu analizy procesu powstawania obrazu za pomocą kamer termowizyjnych stwierdzono, że można wyróżnić sześć etapów powstawania obrazu.

1. Tworzenie wypadkowego rozkładu egzytancji obiektu $M'(x, y, \lambda, T)$ przez rozkład emisyjności na powierzchni obiektu $\varepsilon(x, y, \lambda)$ oraz rozkład temperatur na powierzchni obiektu $M(x, y, \lambda, T)$

$$M'(x, y, \lambda, T) = M(x, y, \lambda, T) \cdot \varepsilon(x, y, \lambda) \tag{1}$$

gdzie:

x, y – współrzędne w układzie kartezjańskim,
λ – długość fali,
T – temperatura obiektu.

Zależność egzytancji obiektu M od temperatury i długości fali może być wyznaczona z wykorzystaniem prawa Plancka.

2. Wytworzenie w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu obrazu obserwowanej powierzchni pokrytej powłoką. Natężenie napromienienia tego obrazu może być opisane zależnością

$$M_{op}(x', y', \lambda, T) = \frac{\tau_o(\lambda) M'(\beta \cdot x, \beta \cdot y, \lambda, T)}{4F^2 + 1} \tag{2}$$

gdzie:

β – powiększenie poprzeczne optyki,
F – liczba otworu optyki (stosunek ogniskowej f' do apertury D).

3. Próbkowanie rozkładu natężenia napromienienia w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu przez detektor matrycowy (lub pojedynczy współpracujący z układem przeszukiwania)

$$M_{op(d)}(i,\ j, \lambda, T) = M_{op}\left(x / d_x \cdot,\ y / d_y, \lambda, T\right) \tag{3}$$

gdzie:

i – numer piksela detektora w poziomie,
j – numer piksela detektora w pionie,
d_x – wymiar piksela detektora w poziomie,
d_y – wymiar piksela detektora w pionie.

4. Przekształcenie rozkładu natężenia promieniowania $M_{op}(d)$ wytworzonego w płaszczyźnie detektora na sygnał elektryczny generowany przez piksele detektora

$$S_a(i,\ j) = g \cdot A_d \cdot R^* \int_0^\infty M_{op(d)}(i,\ j, \lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda + V_n \tag{4}$$

gdzie:

A_d – powierzchnia pojedynczego piksela detektora,
R^* – maksymalna czułość detektora,
$s(\lambda)$ – względna czułość widmowa detektora,
g – wzmocnienie toru analogowego,
V_n – sygnał szumów na wyjściu toru analogowego.

V_n może być wyznaczony według wzoru

$$V_n = g \frac{R^* \sqrt{A_d \Delta f}}{D^*} \tag{5}$$

gdzie:

D^* – szczytowa wykrywalność detektora,
Δf – ekwiwalentne pasmo szumów.

5. Cyfryzacja wzmocnionego sygnału analogowego

$$S_d(i,\ j) = 2^n \left[\frac{S_a(i,\ j) + V_n}{S_{\max}} \right] \tag{6}$$

gdzie:

n – liczba bitów przetwornika *A/C*,
S_{max} – maksymalny sygnał na wejściu przetwornika *A/C*.

6. Regulacja kontrastu i jaskrawości w sposób automatyczny lub przez użytkownika z wykorzystaniem oprogramowania

$$S_{vis}(i, j) = br + co \cdot S_d(i, j) \tag{7}$$

gdzie:

br – poziom offsetu (poziom przesunięcia jaskrawości),
co – poziom kontrastu.

Sygnał $S_{vis}(i, j)$ jest następnie wizualizowany na ekranie poprzez przypisanie wartościom tego sygnału poziomu szarości w przedziale od 0 do 255.

Zaprezentowany powyżej model matematyczny umożliwia wyznaczenie obrazu obiektu obserwowanego z wykorzystaniem kamery termowizyjnej o znanych parametrach.

4. Struktura symulatora

Symulator Simter jest programem komputerowym napisanym w języku Visual C++.NET z wykorzystaniem biblioteki OpenGL, pracującym w systemie operacyjnym Windows 98/2000/XP.

Z punktu widzenia użytkownika program Simter zbudowany jest z czterech okien (modułów) takich, jak wymienione poniżej (rys. 1–4).

1) Moduł główny (okno główne).
2) Edytor obiektów (klawisz Obiekty).
3) Edytor charakterystyk kamery termowizyjnej (klawisz Kamera).
4) Okno ustawień programu (klawisz Opcje).

Moduł główny symulatora Simter spełnia cztery główne funkcje:

1) generuje obraz termalny obserwowanego obiektu,
2) umożliwia zadawanie warunków obserwacji,
3) umożliwia zadanie bieżących nastaw symulowanej kamery,
4) umożliwia komunikację z pozostałymi modułami.

Pierwsza funkcja polega na generowaniu w centralnej części okna głównego obrazu termalnego, który byłby wytworzony przez symulowaną kamerę. Obraz zależy od zadanych warunków obserwacji, bieżących nastaw oraz parametrów symulowanej kamery termowizyjnej.

Funkcja druga umożliwia symulowanie wpływu warunków obserwacji na generowany obraz, gdzie do warunków obserwacji zaliczamy następujące czynniki: widzialność, siłę wiatru, temperaturę otoczenia, odległość obiekt-kamera oraz położenie obiektu.

Trzecia funkcja umożliwia symulowanie wpływu bieżących nastaw kamery na generowany obraz poprzez zapewnienie możliwości regulacji przez użytkownika szeregu bieżących nastaw kamery takich, jak: poziom (jaskrawość), wzmocnienie (kontrast), pole widzenia, polaryzacja obrazu, zoom elektroniczny, ostrość obrazu oraz korekcja niejednorodności.

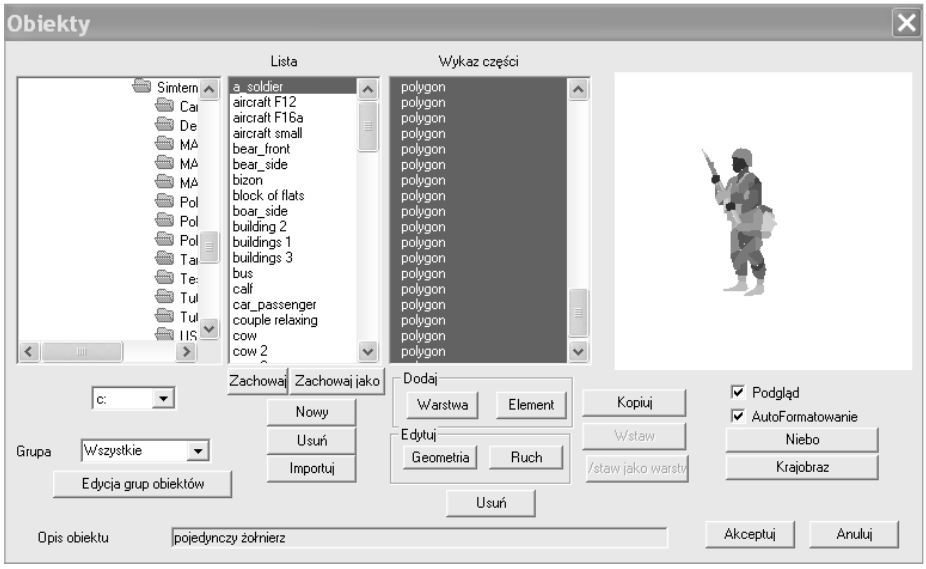
Funkcja czwarta umożliwia komunikację z pozostałymi modułami: edytorem obiektów i scenerii, edytorem charakterystyk kamery oraz oknem ustawień programu.

Moduł edytora obiektów umożliwia tworzenie oraz edycję obiektów. Obiekty są tworzone jako suma wielokątów zamkniętych. Każdemu wielokątowi przyporządkowana jest pewna różnica temperatury względem temperatury otoczenia. Wielokąty mogą być położone w warstwach znajdujących się w różnych odległościach od kamery, co umożliwia tworzenie obiektów klasy pośredniej pomiędzy obiektami dwuwymiarowymi a obiektami trójwymiarowymi. Z kolei scenerie są tworzone w postaci bitmap. Możliwe jest przypisanie obiektom charakterystyk dynamicznych opisujących zmianę ich położenia oraz charakterystyk czasowych umożliwiających zmiany wyglądu obiektu w zależności od czasu prowadzenia obserwacji.

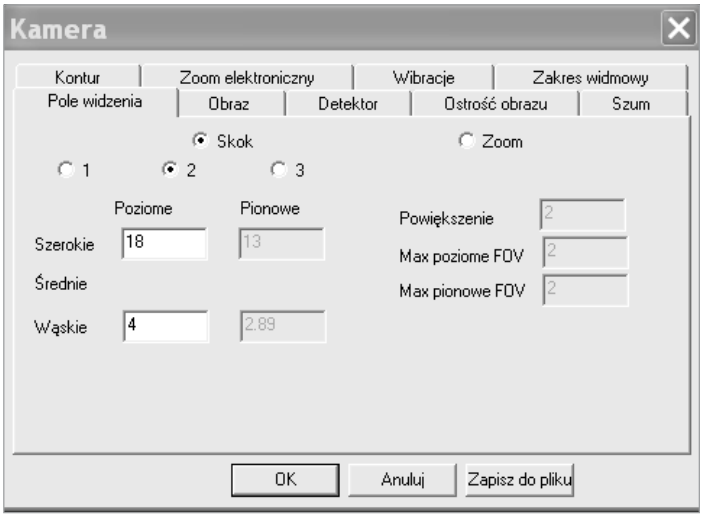
Rys. 1. Główne okno symulatora Simter 2.2

Moduł symulacji kamery jest sercem programu. Moduł ten umożliwia zadawanie szeregu parametrów symulowanej kamery takich, jak: pole widzenia, typ obrazu (format, poprawa rozdzielczości, zakres automatycznego kontrastu), typ i rozdzielczość detektora, charakterystyki określające ostrość obrazu (funkcja rozmycia linii LSF, funkcja przenoszenia modulacji MTF, funkcja minimalnej rozróżnialnej różnicy temperatur), charakterystyki określające szum kamery (rozdzielczość temperaturowa NETD, szum przestrzenny FPN,

niejednorodność matrycy, liczba martwych pikseli, migotanie obrazu oraz zmiany tych charakterystyk w czasie), wibracje, zakres regulacji powiększenia elektronicznego, włączenie/wyłączenie poprawy konturu oraz zakres widmowy kamery. Na podstawie zadanych parametrów program Simter generuje obraz termalny prawie identyczny jak obraz symulowanej realnej kamery termowizyjnej.



Rys. 2. Okno edytora obiektów



Rys. 3. Okno edytora charakterystyk kamery

Okno ustawień (rys. 4), umożliwia dokonywanie zmian wyglądu zewnętrznego oraz funkcji okna głównego programu Simter. Okno ustawień jest zbudowane z czterech nowych okien: TRYB PRACY, KOMUNIKACJA, INTERFEJS oraz CHARAKTERYSTYKI CZASOWE. Bezpośrednio po aktywacji okna ustawień widzimy okno „Tryb pracy".

Rys. 4. Okno ustawień

Użytkownik ma do wyboru trzy główne tryby pracy:

1) Standard.
2) Samouczek.
3) Test.

Tryb Standard służy do symulacji procesu obserwacji z wykorzystaniem kamer termowizyjnych. Tryb Samouczek służy do demonstracji funkcji symulatora prowadzonej w sposób automatyczny, a tryb Test do sprawdzenia poziomu wiedzy szkolonych studentów w zakresie techniki termowizyjnej.

Okno KOMUNIKCJA umożliwia ustalenie zasad komunikacji z pozostałymi komputerami znajdującymi się w sieci.

Możliwe są trzy tryby pracy komunikacji pomiędzy programami Simter pracującymi w sieci:

1) Neutralny.
2) Nadrzędny.
3) Podrzędny.

W trybie komunikacji Neutralny nasz program Simter nie komunikuje się z pozostałymi programami Simter pracującymi w sieci. Jeżeli wybierzemy tryb Nadrzędny, to nasz program Simter wysyła do pozostałych programów Simter zainstalowanych w sieci żądanie podporządkowania. Żądanie to zostanie odrzucone przez programy Simter pracujące w try-

bie Neutralny, natomiast zaaprobowane przez programy pracujące w trybie Podrzędny. Zaakceptowanie wezwania o podporządkowanie spowoduje, że użytkownik programu Simter pracującego w trybie Podrzędny traci nad nim kontrolę. Jego program Simter wykonuje komendy wysyłane przez użytkownika programu Simter pracującego w trybie Nadrzędny.

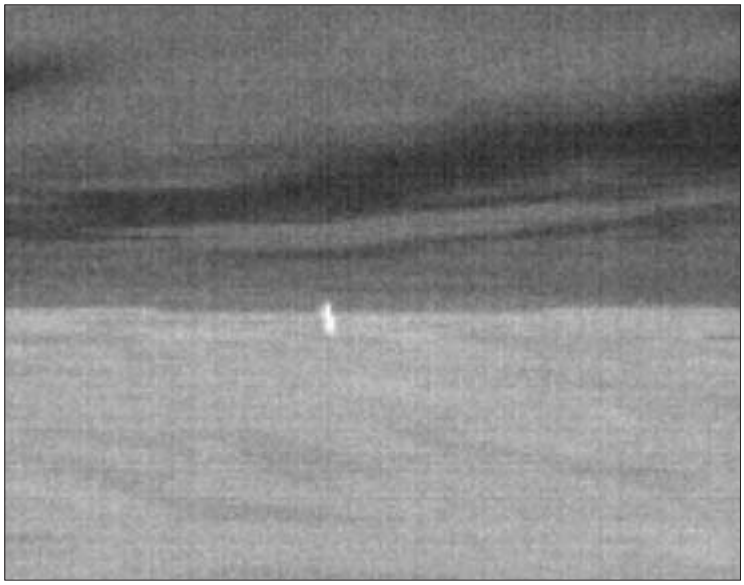
Okno INTERFEJS umożliwia dokonanie wyboru języka oraz wyglądu zewnętrznego interfejsu graficznego. Wybór jest ograniczony do dwóch języków: angielski lub polski.

Okno CHAKTERYSTYKI CZASOWE służy do umożliwienia zmian charakterystyk obiektów i tła w zależności od czasu prowadzonej obserwacji, czyli w zależności od precyzyjnie zdefiniowanej pory roku i pory dnia.

5. Wykorzystanie symulatora

W celu zapewnienia wysokiej efektywności obserwacji z wykorzystaniem kamer termowizyjnych ich operator musi perfekcyjnie opanować dostępne mechanizmy regulacji kamery, zapamiętać obrazy termalne typowych obiektów w różnych warunkach otoczenia oraz poznać granice możliwości obserwacyjnych kamery. Oznacza to dla operatora konieczność spędzenia setek godzin, wykorzystując kamerę w różnorodnych warunkach terenowych i pogodowych, w ramach czasochłonnego i kosztownego szkolenia. Za pomocą symulatora Simter umożliwiającego generację realistycznych obrazów termalnych (rys. 5 i 6) można ograniczyć czas i koszty praktycznego szkolenia operatorów naziemnych kamer termowizyjnych, realizując znaczną część szkolenia w sali wykładowej, ale symulując realne warunki obserwacji.

Rys. 5. Obraz pojedynczego żołnierza uzyskany z wykorzystaniem chłodzonej kamery termowizyjnej o wąskim polu widzenia w warunkach lekkiej mgły z odległości 1000 m



Rys. 6. Obraz pojedynczego żołnierza uzyskany z wykorzystaniem niechłodzonej kamery termowizyjnej o średnim polu widzenia w warunkach lekkiej mgły z odległości 500 m

6. Wnioski

Program Simter 2.2 jest komputerowym symulatorem kamer termowizyjnych umożliwiającym generowanie realistycznych obrazów termalnych serii wybranych obiektów, które byłyby wygenerowane przez symulowane kamery termowizyjne w zadanych warunkach obserwacji.

Obrazy generowane przez symulator Simter są obrazami statycznymi, co ogranicza jego zastosowanie głównie do symulacji naziemnych kamer termowizyjnych, gdzie w przypadku obserwacji obiektów dalekich nawet obrazy obiektów ruchomych są prawie statyczne. Jedynie w ograniczonym stopniu może być wykorzystywany do symulacji lotniczych kamer termowizyjnych ze względu na znaczną dynamikę zmian obrazów występującą w zastosowaniach lotniczych.

Unikalną cechą symulatora Simter jest możliwość dokładnej symulacji kamery termowizyjnej poprzez zadanie szeregu parametrów kamery. Umożliwia to symulację konkretnego typu kamery termowizyjnej w różnorodnych warunkach obserwacji. Pozwala to na dokonanie realnej oceny możliwości symulowanej kamery już na sali komputerowej.

Praca z wykorzystaniem symulatora Simter nie może zastąpić praktycznej kilkusetgodzinnej pracy z kamerą termowizyjną niezbędnej do osiągnięcia wysokiego poziomu wyszkolenia operatora kamer termowizyjnych. Jednakże, wykorzystując symulator Simter, można znacznie ograniczyć czas i koszty praktycznego szkolenia operatorów naziemnych kamer termowizyjnych, realizując znaczną część szkolenia w sali wykładowej, ale symulując realne kamery termowizyjne i realne warunki obserwacji.

Szkolenie w takich warunkach umożliwia szybkie zapamiętanie obrazów termalnych szeregu obiektów w różnorodnych warunkach obserwacji oraz perfekcyjne opanowanie dostępnych mechanizmów regulacji kamery. Przede wszystkim jednak szkolenie z wykorzystaniem symulatora Simter umożliwia szybkie, dokładne poznanie symulowanej kamery termowizyjnej. Poznanie zaś granic możliwości symulowanego sprzętu umożliwia optymalne jego wykorzystanie.

Symulator Simter może być również cennym narzędziem na etapie planowania zakupów sprzętu termowizyjnego. Wykorzystując symulator można szybko określić precyzyjne wymagania techniczne dla kamer termowizyjnych, optymalnie dopasowane do planowanych zastosowań.

Symulator Simter jest również przydatny w pracach nad optymalizacją rozlokowania sprzętu termowizyjnego. Wykorzystując symulator, można szybko ustalić zasięgi skutecznej obserwacji posiadanych kamer termowizyjnych w typowych warunkach obserwacji i dostosować rozlokowanie kamer do oszacowanych zasięgów.

Dążąc do rozszerzenia zakresu stosowania symulatora Simter, autorzy referatu prowadzą obecnie prace nad opracowaniem jego nowej wersji, która mogłaby być wykorzystana do szkolenia operatorów kamer termowizyjnych montowanych na śmigłowcach.

Literatura

[1] Ruffner J., Woodward K.: *Computer-based and web-based applications for night vision goggle training.* Proc. SPIE, Vol. 4361, Helmet- and Head-Mounted Displays VI, 2001, p. 148–158

[2] Tingzhu B., Li N.: *Digital simulation for low-light-level night vision imaging system.* Proc. SPIE, Vol. 4222, Process Control and Inspection for Industry, 2000, p. 100–104

[3] Ruffner J., Woodward K.: *Development of a night vision device driving training aid.* Proc. SPIE, Vol. 3691, Enhanced and Synthetic Vision, 1999, p. 184–194

[4] Lorenzo M., Jacobs E.: *Optimized mapping of radiometric quantities into OpenGL.* Proc. SPIE, Vol. 3694, Modeling, Simulation, and Visualization for Real and Virtual Environments, 1999, p. 173–182

[5] Lorenzo M., Deaso B.: *DIS IR simulation models for fidelity, signature texture, and atmosphere sensor effects.* Proc. SPIE, Vol. 2495, Distributed Interactive Simulation Systems Applications, 1999, p. 42–50

[6] CAE Invertron's: *Intrest – Target Recognition system trainer.* Manual, 1995

[7] Garbo D., Olson E., Crow D., Coker C.: *Real-Time Three Dimensional Infrared Scene Generation Utilizing Commercially Available Hardware (2741-11).* SPIE OE/Aerospace Sensing Conference, 1996

[8] http://thermoanalytics.com/

[9] http://www.cae.ca/

[10] http://www.multigen-paradigm.com

[11] http://www.es.com

[12] http://www.quantum3d.com

[13] Chrzanowski K., Krupski M.: *Generator obrazów termalnych – image generator.* Półrocznik AGH Automatyka, t. 7, z. 3, 2003, s. 509–516

[14] Chrzanowski K., Krupski M.: *Computer simulator for training operators of thermal cameras.* Enhanced and Synthetic Vision 2004, Orlando, USA, 13–15.04.2004