

Alina Wróbel  
Andrzej Wróbel

## BADANIE DOKŁADNOŚCI ODWZOROWANIA OBIEKTÓW NA PODSTAWIE STEREOPARY ZDJEĆ TERMOGRAFICZNYCH <sup>1)</sup>

*Streszczenie.* Obraz termo graficzny ukazuje rozkład temperatury powierzchni obiektu. Jeśli obiekt ma zróżnicowaną temperaturę to obserwacja stereoskopowa obrazów termograficznych powinna umożliwić utworzenie przestrzennego obrazu tego obiektu. Pomogłoby to w identyfikacji elementów obiektu, a zatem ułatwiłoby interpretację termogramów. Umożliwiłoby również uzyskiwanie bezpośrednio z termogramów geometrii rozkładu temperatury bez konieczności dodatkowych pomiarów fotogrametrycznych.

Rozkład temperatury na powierzchni obiektu ma charakter ciągły. Powoduje to rozmycie szczegółów na termogramie, co w porównaniu do obrazów w paśmie widzialnym, zwiększa błąd pomiaru wybranych punktów obiektu.

### 1. Wstęp

Obraz termograficzny jest obrazem rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu, rejestrowanym w zakresie podczerwieni dalekiej znajdującej się poza pasmem promieniowania widzialnego. Może on zdecydowanie różnić się od obrazu w zakresie widzialnym, zwłaszcza, jeśli rozkład temperatury nie jest wyraźnie związany z kształtem obiektu. Utrudnia to interpretację termogramów. Aby ją ułatwić często wykonuje się zdjęcia fotograficzne, z reguły z tych samych stanowisk, z których prowadzi się obserwacje termograficzne. Ułatwieniem w powiązaniu ze sobą tych obrazów jest sprzężenie kamery termograficznej z kamerą cyfrową [Sawicki, Więcek 1998; Sawicki 1999]. Najnowsze kamery termograficzne (np. ThermaCam SC 2000, firmy FLIR) mają fabrycznie wbudowany aparat cyfrowy, umożliwiający rejestrację obrazu w paśmie widzialnym. Działania te czynią interpretację termogramów znacznie łatwiejszą, ale wymagają równoczesnego korzystania z dwóch obrazów: jeden w paśmie podczerwieni termalnej i drugi w paśmie widzialnym. Pojawia się pytanie: na ile obserwacja stereoskopowa byłaby pomocna w interpretacji obrazów termalnych. Na to pytanie starali się odpowiedzieć autorzy niniejszego opracowania.

---

1) praca wykonana w ramach badań statutowych AGH

## 2. Wykonanie stereopary obrazów termograficznych

Sposób wykonania stereopary obrazów termograficznych nie różni się zasadniczo od procedury stosowanej przy rejestracji stereoskopowych zdjęć fotograficznych. Aby obserwacja stereoskopowa była możliwa obrazy muszą być wykonane z dwóch różnych punktów tak, aby osie kamery na obu stanowiskach były do siebie w przybliżeniu równoległe (w granicach kilku stopni) oraz tak, aby skala obydwu obrazów nie różniła się od siebie więcej niż 15%. Wzajemna odległość stanowisk zależy od celu, jakiemu mają służyć rejestrowane obrazy. Jeżeli chodzi tylko o dobrą obserwację stereoskopową wspomagającą interpretację to baza powinna mieć długość od około 1/20 do około 1/100 odległości do obiektu. Model stereoskopowy utworzony z tak wykonanych obrazów wygodnie się obserwuje.

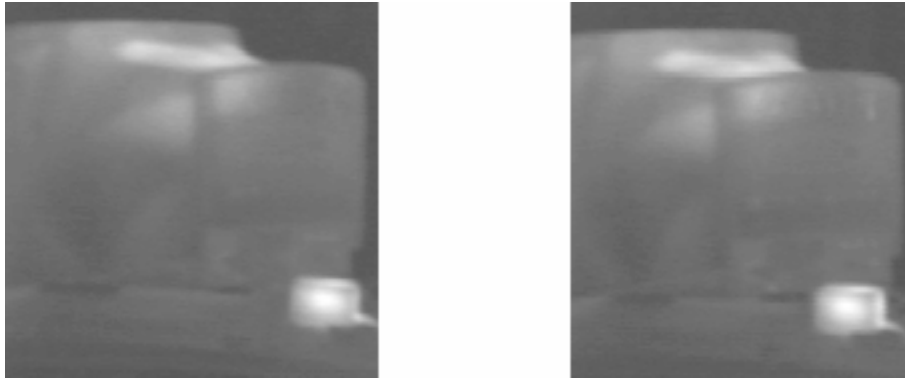
Jeżeli planowane jest określanie geometrii na podstawie stereopary termogramów, długość bazy zależna jest od dokładności opracowania. Przy projektowaniu pomiaru termograficznego należy wówczas wziąć pod uwagę rozdzielczość kamery, dystorsję obiektywu i dokładność identyfikacji szczegółów na obrazie.

Najnowsze kamery posiadają matrycę detektorów o rozmiarach 320x240 pikseli. Jest to liczba znacznie mniejsza od ilości pikseli fotograficznych aparatów cyfrowych. Obiektywy kamer termograficznych posiadają stosunkowo duże błędy. Badania niektórych z nich wykazały [Wróbel 2000], że wartości tych błędów mogą lokalnie osiągać od 1.5 do 2 pikseli. Dokładność identyfikacji szczegółów na obrazie termograficznym w dużej mierze zależy od charakteru obiektu. Rozkład temperatury na powierzchni każdego obiektu cechuje się mniejszą lub większą płynnością. Kontrastowe granice nie pojawiają się nigdy, chyba, że obserwujemy krawędź jednej powierzchni na tle drugiej powierzchni lub tła o wyraźnie innej temperaturze. Powoduje to trudności w identyfikacji poszczególnych szczegółów obrazu. W wyniku badań przeprowadzonych na teście [Wróbel 2000] o specjalnie sygnalizowanych termicznie punktach, stwierdzono, że dokładność identyfikacji tych punktów wynosiła około 0.2 piksela. W praktyce obraz termalny szczegółów obserwowanych powierzchni obiektów jest przeważnie znacznie mniej wyraźny. Uznać można, że dokładność identyfikacji takich szczegółów waha się od 0.3 do nawet jednego piksela.

Biorąc to wszystko pod uwagę, można stwierdzić, że dokładność opracowania geometrii obiektu na podstawie obrazów termograficznych, będzie znacznie niższa, niż na podstawie zdjęć fotograficznych wykonanych z tych samych stanowisk.

## 3. Obserwacja stereoskopowa obrazów termograficznych

Przed rozpoczęciem badań przewidywano, że obserwacja stereoskopowa obrazów termograficznych może czasami sprawiać duże trudności. Szczególnie obawiano się rozmycia konturów, spowodowanego wspomnianą wcześniej płynnością rozkładu temperatury na powierzchni obiektu. Sprawia ona, że obraz termalny nie jest tak ostry jak na zwykłej fotografii. Na rys. 1. przedstawiono stereoskopową parę termogramów, monitora komputerowego o ustabilizowanej temperaturze.



Rys. 1. Termalny stereogram monitora komputerowego

Obrazy przedstawione na rys.1, jeśli są w małej skali, obserwuje się stereoskopowo stosunkowo łatwo. Jeśli jednak powiększymy skalę obrazu na ekranie i spróbujemy osadzać na modelu znaczek pomiarowy, okaże się, że napotkamy miejscami duże trudności. Spowodowane jest to m.in. wspomnianym wyżej rozmyciem obrazu oraz drobnymi różnicami obrazu wynikającymi z wewnętrznych szumów kamery. Drobne różnice obrazu częściowo można zlikwidować przez przefiltrowanie obrazu. Niewiele to jednak polepsza jakość osadzania znaczką.

Opisane powyżej termogramy wykonywano w korzystnych warunkach. Obserwowany monitor miał ustabilizowaną temperaturę, a interwał czasu pomiędzy rejestracją z obydwu stanowisk był dość krótki. Trudniejsze warunki będą wówczas, gdy obiekt ma niezbyt ustabilizowaną temperaturę, a dodatkowo odstęp czasu pomiędzy rejestracją z obydwu stanowisk wydłuża się. Tak jest często, gdy prowadzone są pomiary maszyn i urządzeń w czasie pracy lub, gdy badane są obiekty na wolnym powietrzu. Niewielkie zmiany parametrów procesu technologicznego lub zmiana warunków atmosferycznych (wiatru, temperatury powietrza) w połączeniu z czasem potrzebnym na przemieszczanie się z jednego stanowiska na drugie, powodują zmiany temperatury obserwowanej powierzchni. W efekcie lewy i prawy termogram różnią się nieco między sobą. Różnice te powodują pogorszenie jakości obserwacji stereoskopowej. Nie jest to tak istotne, jeżeli na tych termogramach nie wykonuje się pomiarów geometrii zarejestrowanego obiektu. Do pomocy przy interpretacji termogramów zazwyczaj obserwuje się, bowiem model stereoskopowy w małej skali. Osadzanie znaczką pomiarowego, zwłaszcza na powiększonym obrazie, będzie napotykało duże trudności. Jeżeli temperatura fragmentu obiektu zmieniła się wyraźnie pomiędzy momentem rejestracji lewego i prawego termogramu, to może się okazać, iż obserwacja modelu stereoskopowego w tym miejscu jest niemożliwa. Różnice pomiędzy lewym a prawym obrazem można nieco zminimalizować dobierając odpowiednio paletę kolorystyczną, w której prezentowane są temperatury. Najmniej zróżnicowane będą obrazy przedstawione w kolorystyce czarno-białej. Nieco bardziej różnić będą się obrazy w miarę jednorodnej kolorystyce np. w odcieniach żółci i czerwieni, lub niebieskiego, zielonego i żółtego. Najgorzej obserwować się będzie obrazy w paletce o bardzo zróżnicowanych kolorach. Niestety

interpretacja termogramów jest najdokładniejsza przy zastosowaniu bardzo różnicowanej palety, a najmniej dokładna przy kolorystyce czarno-białej.

Aby określić rząd dokładności, jakiej można spodziewać się przy pomiarze stereopary termogramów wykonano rejestrację pola testowego. Jeden z termogramów tego pola testowego przedstawiono na rys. 2.

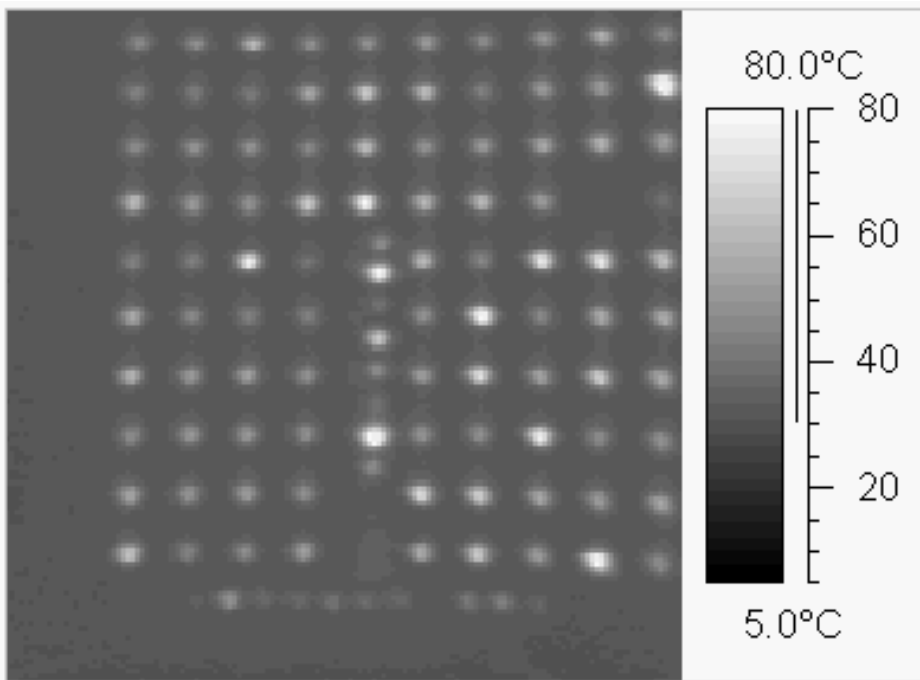
Test był oddalony od kamery o około 6 m, a długość bazy wynosiła około 60 cm. Obiektów kamery miał kąt widzenia  $12^{\circ}$ . Termogramy wykonano z bazy stanowiącej 1/10 odległości do testu. Stosunek bazowy był więc podobny do stosowanego w niektórych zagadnieniach fotogrametrii naziemnej. Wszystkie punkty testu (w ilości około 120) pomierzono tachimetrem elektronicznym TCR firmy Leica. Do utworzenia modelu stereoskopowego oraz do pomiarów na nim zastosowano autograf cyfrowy VSD-AGH. Model zbudowano wykorzystując transformację DLT. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono uzyskane dokładności orientacji modelu

Tabela 1

Ilość punktów dostosowania	Lewy obraz		Prawy obraz		Współrzędne terenowe		
	<b>m<sub>x</sub></b> [piksel]	<b>m<sub>y</sub></b> [piksel]	<b>m<sub>x</sub></b> [piksel]	<b>m<sub>y</sub></b> [piksel]	<b>m<sub>X</sub></b> [m]	<b>m<sub>Y</sub></b> [m]	<b>m<sub>Z</sub></b> [m]
<b>9</b>	0.44	0.44	0.39	0.38	0.0031	0.0035	0.0081
<b>21</b>	0.46	0.72	0.41	0.64	0.0035	0.0059	0.0199

W zestawieniu tym widać, że wraz ze wzrostem liczby punktów dostosowania rosną średnie błędy wpasowania. Wynika to z rozkładu błędów pomiaru na poszczególnych fotopunktach.

Na modelu pomierzono wszystkie punkty i porównano ich współrzędne z pomierzonymi geodezyjnie. W tabeli 2 przedstawiono uzyskane dokładności (oś Z jest równoległa do osi kamery). Ze względu na charakter testu (zbiór pojedynczych ciepłych punktów), oraz na fakt, iż część punktów testu zmieniała temperaturę w trakcie rejestracji termogramów, obserwacja stereoskopowa była bardzo utrudniona. Dlatego początkowo wykonano pomiar testu monokularnie. Wyniki tego pomiaru przedstawiono w pierwszych trzech wierszach tabeli. Następnie pomierzono punkty testu stereoskopowo wykorzystując do orientacji dwadzieścia jeden fotopunktów. Wyniki uzyskane tym razem przedstawiono w ostatnim wierszu. Widać, że wyraźnie wzrósł błąd osadzenia znaczka pomiarowego w kierunku równoległym do osi kamery. Potwierdza to „wizualne” spostrzeżenia dotyczące obserwacji stereoskopowej obrazów termograficznych, jeżeli temperatury zarejestrowane na obu obrazach nieco się różnią.



Rys. 2. Lewy termogram pola testowego

Na modelu pomierzono wszystkie punkty i porównano ich współrzędne z pomierzonymi geodezyjnie. W tabeli 2 przedstawiono uzyskane dokładności (oś Z jest równoległa do osi kamery). Ze względu na charakter testu (zbiór pojedynczych ciepłych punktów), oraz na fakt, iż część punktów testu zmieniała temperaturę w trakcie rejestracji termogramów, obserwacja stereoskopowa była bardzo utrudniona. Dlatego początkowo wykonano pomiar testu monokularnie. Wyniki tego pomiaru przedstawiono w pierwszych trzech wierszach tabeli. Następnie pomierzono punkty testu stereoskopowo wykorzystując do orientacji dwadzieścia jeden fotopunktów. Wyniki uzyskane tym razem przedstawiono w ostatnim wierszu. Widać, że wyraźnie wzrósł błąd osadzenia znacznika pomiarowego w kierunku równoległym do osi kamery. Potwierdza to „wizualne” spostrzeżenia dotyczące obserwacji stereoskopowej obrazów termograficznych, jeżeli temperatury zarejestrowane na obu obrazach nieco się różnią.

Tabela 2

Ilość punktów dostosowania	mX [m]	mY [m]	mZ [m]
6	0.0038	0.0116	0.0455
9	0.0031	0.0133	0.0357
21	0.0032	0.0058	0.0278
21-pom. stereo	0.0035	0.0054	0.0424

#### 4. Podsumowanie

Obserwacja stereoskopowa termogramów może być pomocnym narzędziem przy ich interpretacji. Przeprowadzony eksperyment wykazał, że mimo spodziewanych trudności model stereoskopowy utworzony z odpowiednio wykonanych termogramów jest wyraźnie widoczny. Niestety obserwacja stereoskopowa drobnych szczegółów obrazu jest utrudniona. Są tego dwie przyczyny: rozmycie obrazu wynikające z ciągłego rozkładu temperatury na obserwowanej powierzchni oraz zmiany tej temperatury w czasie pomiędzy zarejestrowaniem lewego i prawego termogramu.

Trudna obserwacja stereoskopowa szczegółów obrazu powoduje niedokładne osadzanie znacznika pomiarowego. Mimo tych problemów, uzyskano lepsze niż się spodziewano dokładności pomiaru geometrii zarejestrowanego na termogramach testu. Jeżeli zatem nie jest potrzebna wysoka dokładność geometrii badanego obiektu, można ją uzyskać z modelu stereoskopowego utworzonego z termogramów.

#### 5. Literatura:

Sawicki Piotr, Więcek Bogusław (1998). „Cyfrowy system video termalny dla aplikacji w bliskim zasięgu” *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 8.

Sawicki Piotr (1999). „Opracowanie obrazów cyfrowych w systemie video-termalnym VISION-PLUS” *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 9.

Wróbel Alina (2000). „Badanie dokładności geometrycznej obrazów termograficznych” *IV Konferencja Krajowa Termografii i Termometrii w Podczerwieni*, Łódź

Recenzował: dr inż. Ryszard Preuss