

Ćwiczenie 5

Uruchomienie kamery termowizyjnej. Kalibracja i mody pracy. Dobór zakresu temperatur. Wykonanie pomiarów medycznych.

I. Część teoretyczna

Idea pomiarów termowizyjnych polega na rejestrowaniu natężenia promieniowania ciepłego emitowanego przez ciała o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego, czyli 0 K (-273,15°C). Podczas pomiarów promieniowania wykorzystywana jest podczerwień, która podzielona jest na 3 pasma: bliska podczerwień (0,7-5 μm), średnia podczerwień (5-30 μm), daleka podczerwień (30-1000 μm). Działanie termowizji opiera się na **prawie Plancka**. Podaje ono zależność zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego od częstotliwości lub długości fali i temperatury.

$$\varepsilon(\nu, T) = \frac{2\pi^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\left[\frac{h\nu}{kT}\right]} - 1} ; (1)$$

gdzie:

- c - prędkość światła w próżni 2.998 x 10¹⁰ cm/s
- h - stała Plancka 6.626 x 10⁻³⁴ Js
- k - stała Boltzmanna 1,381 x 10⁻²³ J/K
- ε - zdolność emisyjna ciała
- ν - częstotliwość fali
- T – temperatura

Zdolność emisyjna ciała opisana powyższym wzorem zależy od wielu czynników. Chcąc przeprowadzić wiarygodny pomiar za pomocą kamery termowizyjnej należy znać np.:

- temperaturę materiału,
- strukturę powierzchni materiału,
- kąt obserwacji,
- rodzaj materiału z którego wykonany jest obiekt,
- wartość wilgotności oraz temperatury panującej w pomieszczeniu.

W przypadku naszych pomiarów będziemy korzystać z faktu, iż promieniowanie pochodzące od każdego ciała możemy zapisać w funkcji temperatury. W wyniku zastosowania odpowiedniego algorytmu w oprogramowaniu kamery, możemy obserwować na niej rozkład temperatury w postaci termogramów.

Temperatura materiału, otoczenia, odległość, wilgotność.

Podanie rzeczywistych wartości wyżej wymienionych wielkości ma duże znaczenie w otrzymaniu poprawnego wyniku końcowego – termogramu. Wszystkie te parametry związane są z „warunkami” w jakich znajduje się badany obiekt oraz kamera. Podanie odpowiednich wartości temperatur oraz odległości obiektu od obiektywu kamery ma za zadanie określić ilość pochłoniętego promieniowania podczerwonego przez atmosferę. Warto również podkreślić fakt, iż wraz z odległością transmitancja atmosfery spada.

Emisyjność

Jak już zostało wspomniane na wiarygodność pomiarów wpływa odpowiedni dobór współczynnika emisyjności badanego obiektu. W zależności od materiału z jakiego został on wykonany mamy różne współczynniki emisyjności. Tak naprawdę pod pojęciem emisyjności kryje się wielkość mówiąca nam o tym, w jakim stopniu promieniowanie emitowane przez obiekt różni się od promieniowania jakie emitowałby ten obiekt, gdyby był „ciałem czarnym”.

Jeżeli wartość ε jest duża to obiekt jest bardzo dobrze „mierzalny” przez kamerę – jeśli natomiast wartość emisyjności jest bliska zeru, wtedy obiekt jest praktycznie „niemierzalny” przez kamerę.

Przed wykonaniem pomiarów kamerą termowizyjną, należy wprowadzić do niej wartość emisyjności badanego obiektu. Nie podanie wartości emisyjności lub podanie błędnej wartości, będzie powodowało otrzymanie błędnego wyniku.

Współczynnik emisyjności ε obiektów o wysokiej temperaturze, zależny od kąta obserwacji α , dla dowolnego punktu krzywizny walca lub ε dowolnej powierzchni płaskiej, można także wyznaczyć, stosując przybliżoną zależność:

$$\varepsilon \approx \left(\frac{T_w}{T_r}\right)^4, (2)$$

gdzie:

T_w – temperatura wskazana przez kamerę w danym punkcie powierzchni ciała lub krzywizny walca,

T_r – temperatura rzeczywista w danym punkcie powierzchni ciała lub krzywizny walca, zmierzona np. metodą stykową z zastosowaniem termometru.

Tabela emisyjności materiałów w zakresie długości fali 8 - 14 μm dla temperatury powierzchni równej 0°C (o ile nie podano inaczej):

Material	Emisyjność
Aluminium, matowe	0,07
Aluminium, polerowane	0,05
Aluminium, silnie utlenione	0,25
Azbest, lupek	0,96
Azbest, papier	0,94
Azbest, płyta	0,96
Azbest, tkanina	0,78
Brąz, polerowany	0,1
Brąz, porowaty, surowy	0,55
Cegła, standardowa	0,85
Cegła, szklivo	0,85
Cegła, uparty, surowa	0,94
Cement	0,54
Chrom, polerowany	0,1
Cynk, arkusz	0,2

Emalia	0,9
Glina, wypalona	0,91
Guma	0,95
Kwarc	0,93
Szkło	0,92
Woda	0,98
Złoto, polerowane	0,02
Stal, arkusz, niklowana, platerowana	0,11
Papier, biały	0,9
Papier, czarny, błyszczący	0,9
Puszka polerowana	0,05
Lód	0,97

Kąt obserwacji.

Aby dokładnie rozważyć zależność natężenia promieniowania wysyłanego przez element powierzchni ciała czarnego od kąta rozsyłu α należy skorzystać z prawa kosinusów Lamberta. Ma ono postać:

$$M_{o\alpha} = M_{op} \cos \alpha, (3)$$

gdzie:

$M_{o\alpha}$ – natężenie promieniowania wysyłane pod kątem α do normalnej,

M_{op} – natężenie promieniowania wysyłanego w kierunku normalnym do powierzchni.

Należy dodać, iż:

$$M_{op} = \frac{M_o}{\pi}, (4)$$

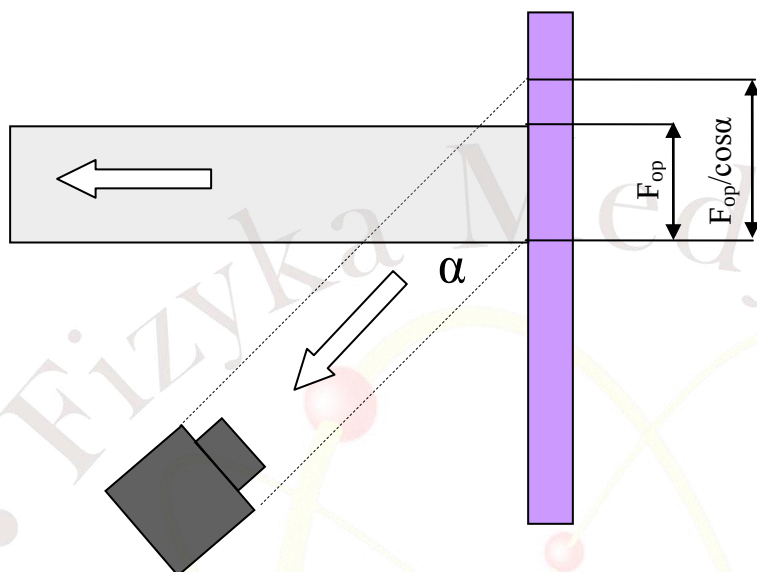
gdzie:

M_o – całkowite natężenie promieniowania wysyłanego z danej powierzchni.

Oznacza to, że M_{op} jest π razy mniejsze niż M_o .

Kamera termowizyjna powinna być ustawiona prostopadle do powierzchni badanego ciała. Innym wypadku kamera termowizyjna obejmuje swoim zasięgiem większą powierzchnię, której pole wyrażone jest wzorem:

$$F_{o\alpha} = \frac{F_{op}}{\cos \alpha}; (5)$$



Skoro mowa jest o większej powierzchni, można byłoby spodziewać się, że do detektora mieszczącego się w kamerze dotrze więcej natężenie promieniowania odbitego od obiektu. Jeśli mówimy o mocniejszym promieniowaniu, powinniśmy w takim razie otrzymać na termogramie większą temperaturę obiektu. Temperatura ta powinna wzrastać wraz ze zwiększaniem kąta α .

Pamiętając o prawie kosinusów Lamberta w wyniku mnożenia przez siebie równań (3) oraz (5) otrzymujemy zależność:

$$M_{o\alpha} \cdot F_{o\alpha} = M_{op} \cdot F_{op} \quad (6).$$

Widać, że niezależnie od kąta obserwacji, do kamery termowizyjnej dociera dokładnie takie samo natężenie promieniowania ciała czarnego – także dla ciała rozpraszającego.

Dla ciała nieczarnego wzór ten będzie słuszny jedynie dla $\alpha < 50^\circ$.

Parametry wykorzystywanej kamery.

Parametry techniczne kamery VIGOcam v50.

Parametr	Wartość / Opis
Typ detektora	Niechłodzona macierz bolometryczna (FPA)
Zakres spektralny	8 – 14 μm
Rozdzielczość obrazu	• 320 x 240 pikseli (60 ramek/s) • 384 x 288 pikseli (30 ramek/s)
Rozdzielczość termiczna	$\leq 0,065^\circ\text{C}$ (dla temperatury 30°C , zakres 1)
Pole widzenia	• $31^\circ \times 23^\circ$ (obiektyw opcjonalny 18 mm) • $16^\circ \times 12^\circ$ (obiektyw standardowy 35 mm) • $9,6^\circ \times 7,2^\circ$ (obiektyw opcjonalny 60 mm)
Rozdzielczość przestrzenna	• 0,71 mrad (obiektyw standardowy 35 mm) • 0,42 mrad (obiektyw opcjonalny 60 mm) • 1,4 mrad (obiektyw opcjonalny 18 mm)
Minimalna odległość pomiaru	• 0,5 m (obiektyw standardowy 35 mm)

Regulacja ostrości	• 0,1 m (obiektyw opcjonalny 18 mm)
Częstotliwość odświeżania	• 1 m (obiektyw opcjonalny 60 mm)
Zoom cyfrowy	Ręczna
Zakresy pomiarowe	60 Hz (NTSC)
Błąd bezwzględny	x2, x4
Tryby pomiaru	• Zakres 1: -20°C do 120°C
	• Zakres 2: -10°C do 400°C
	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ lub $\pm 2\%$ zakresu pomiarowego
	• pirometryczny (pomiar w centralnym punkcie obrazu)
	• pomiar w 5-ciu dowolnie wybranych punktach obrazu
Korekcja	• pomiar temperatury minimalnej i maksymalnej
	• korekcja temperatury otoczenia,
	• korekcja emisyjności,
	• korekcja wpływu atmosfery uwzględniająca odległość od obiektu, temperaturę i wilgotność atmosfery

II. Część praktyczna.

A. Wykonywanie pomiarów:

Po uruchomieniu kamery wprowadzamy wartości temperatury otoczenia, wilgotności, odległości itd. Jest to niezbędne dla uwzględnienia odpowiednich poprawek pomiarowych. Należy ręcznie ustawić ostrość obiektywu, położenie wyświetlacza LCD i dokonać wstępnego przeglądu obiektu. Umożliwi nam to ocenę, czy widoczne są punkty podejrzanego podwyższonej temperaturze, czy pomiar prowadzony jest z odpowiedniej odległości, czy obraz jest prawidłowo wykadrowany i obiekt mieści się w polu widzenia kamery i jej elementarnym kącie widzenia (rozdzielczość przestrzenna). Zależnie od potrzeb możemy dokonać zmiany obiektywu, pamiętając o zmianie w oprogramowaniu kamery. Po wykryciu „gorących punktów” wykonujemy ich zbliżenia podchodząc odpowiednio blisko. Wskaźnik laserowy ułatwia nam celowanie kamerą i lokalizację poszczególnych elementów obiektu. Przed zarejestrowaniem termogramu zaleca się przeprowadzenia procedury NUC naciskając odpowiedni przycisk. Zwiększa to dokładność pomiaru. Rejestrując termogramy, należy się upewnić, czy wartości temperatur maksymalnych nie przekraczają górnej granicy zakresu pomiarowego, co spowodowałoby utratę informacji o rzeczywistej wartości maksymalnej temperatury obiektu. W zależności od potrzeb należy wybrać odpowiedni zakres pomiarowy.

B. Należy zapamiętać kilka praktycznych wniosków:

- Im wyższą temperaturę ma ciało, tym większa jest moc przez niego promieniowana.
- Dla każdej temperatury ciała istnieje charakterystyczna długość fali przy której promieniowana moc osiąga maksimum.
- Wraz ze wzrostem temperatury maksimum promieniowania przesuwa się w stronę fal krótszych. Słońce (temperatura powierzchni 6000K) maksimum promieniowanej mocy występuje dla fali o długości $0,5\mu\text{m}$. Ciało człowieka: (temperatura 300K)

maksimum promieniowanej mocy występuje dla fali o długości $10\mu\text{m}$.

C. Przebieg ćwiczenia:

1. Wyznaczenie przybliżonej wartości emisyjności.
 - a) nakleić na badany obiekt materiał o znanej emisyjności [?taśma o znanej emisyjności i dobrej przewodności cieplnej?]
 - b) podgrzać obiekt do temperatury wyższej przynajmniej o 50°C od temperatury otoczenia; wtedy wyznaczy się emisyjność obiektu dla tej temperatury,
 - c) ustawić *punkt pomiarowy kamery* na obiekcie w miejscu, na którym naklejono wcześniej materiał o znanej emisyjności,
 - d) wprowadzić do kamery znaną wartość emisyjności naklejonego materiału oraz zmierzoną uprzednio wartość: temperatury atmosfery, otoczenia, odległości kamera-obiekt oraz wilgotności atmosfery,
 - e) odczytać temperaturę *punktu pomiarowego* na obszarze obiektu z materiałem o znanej emisyjności,
 - f) przesunąć punkt pomiarowy kamery poza obszar obiektu z naklejonym materiałem o znanej emisyjności, tak zmieniać wartość emisyjności obiektu, aby kamera wskazywała tę samą temperaturę na obiekcie pokrytym materiałem o znanej emisyjności.

Można również wykonać pomiary wykorzystując stykową metodę pomiaru temperatury. Należy tak dostrajać wartość emisyjności w kamerze, aby wskazywała ona tę samą temperaturę, jaką uzyskano, stosując metodę stykową.

Wykonaj termogramy wykonanego pomiaru.

2. Mając ciało ze znaną emisyjnością ε , przeanalizuj wpływ wprowadzenia do kamery nieprawidłowej wartości temperatury atmosfery i otoczenia. Wykonaj termogramy dla poprawnie i niepoprawnie wprowadzonej temperatury. Z czego wynika zaobserwowana różnica?
3. *Próba Reynauda*. Oglądamy i rejestrujemy obraz wyjściowy rąk, następnie oziębiamy je w wodzie o temperaturze 15°C przez jedną minutę i obserwujemy ogrzewanie się palców. Gdy ręce ogrzewają się to próba jest ujemna, czyli prawidłowa. U chorych z dodatnią próbą ręce nie ogrzewają się do temperatury wyjściowej nawet po 20 minutach.
4. Analiza otrzymanych danych pomiarowych z wykorzystaniem oprogramowania THERM dołączonego do kamery.

Zadanie polega na obróbce **otrzymanych** termogramów polegającej na:

- a) zmianie edycji parametrów pomiaru dla otrzymanych obrazów termograficznych (menu **Obraz**),
- b) wykonanie wykresu przebiegu temperatury wzdłuż linii (menu **Obraz**),
- c) wykonaniu dla każdego zdefiniowanego przez użytkownika obszaru oraz dla całego obrazu termograficznego histogramu rozkładu temperatur oraz wykresu trendu temperatury minimalnej, maksymalnej i średniej dla otrzymanych obrazów termograficznych (menu **Obraz**),
- d) wykonaniu nowego obrazu termograficznego uzyskanego poprzez uśrednienie obrazów pochodzących z wielu obrazów (menu **Obraz**),

- e) zmianie podzakresów wyświetlanych temperatur (okno narzędziowe **Paleta kolorów**),
- f) ograniczeniu zakresu danych pomiarowych, dla których przeprowadzane są obliczenia i analiza wyników pomiaru (okno narzędziowe **Obszary**),
- g) porównaniu działania filtrów temperatury oraz filtrów wyświetlania; predefiniowanych jak również definiowanych przez użytkownika (okno narzędziowe **Filtry**).

III. Bibliografia:

1. Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałów i urządzeń / Wiera Oliferuk/2008.
2. Pomiary termowizyjne w praktyce : praca zbiorowa / pod red. Henryka Madury/2004.
3. Detekcja sygnałów optycznych / Zbigniew Bielecki, Antoni Rogalski/2001.
4. Pomiary termowizyjne : przyrządy i metody / Waldemar Minkina ; Politechnika Częstochowska/2004.
5. Obrazowanie biomedyczne / red. tomu Leszek Chmielewski, Juliusz Lech Kulikowski, Antoni Nowakowski/2004.
6. Termometria : przyrządy i metody / Ludwik Michalski, Krystyna Eckersdorf, Jacek Kucharski/1998/
7. Termowizja i jej zastosowanie / Grzegorz Rudowski/1978/.
8. Zastosowanie metody kodowania frontów falowych w termowizji / Adam Czerwiński/2010/
9. Przestrzenna wizualizacja uzyskanego metodą termograficzną rozkładu temperatury na ścianach budynku / Aleksandra Rejowicz
Praca dyplomowa/AGH/2009/
10. <http://www.infratec.de>
11. <http://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/>

