

Anna Fabijańska*, Dominik Sankowski*

Kalibracja systemu wizyjnego z kamerą CCD na potrzeby wysokotemperaturowych pomiarów właściwości powierzchniowych

1. Wprowadzenie

Matryce CCD są urządzeniami elektronicznymi, składającymi się z kilku milionów pojedynczych elementów światłoczułych, popularnie zwanych pikselami. Z uwagi na ograniczenia technologiczne, nie jest jednak możliwe wyprodukowanie takiej matrycy, w której wszystkie elementy światłoczułe miały by jednakowe właściwości. Natomiast nawet niewielkie różnice w sposobie generacji ładunków oraz reakcji na światło poszczególnych pikseli, mogą w znaczącym stopniu wpłynąć na jakość obrazów cyfrowych.

Większość ze znanych dotychczas metod korekcji niedoskonałości detektorów CCD dotyczy głównie aplikacji wymagających bardzo długich czasów ekspozycji, stosowanych przede wszystkim w astronomii [2, 3, 6, 8]. Tymczasem, problem ten może okazać się istotny również w przypadku specjalistycznych kamer cyfrowych o czasie ekspozycji rzędu kilkudziesięciu milisekund.

W niniejszym artykule przedstawiony został proces kalibracji kamery CCD o krótkim czasie ekspozycji dla potrzeb wysokotemperaturowych pomiarów napięcia powierzchniowego i wyznaczania kątów zwilżania wybranych metali i ich stopów. Ponieważ wyznaczenie tych wielkości odbywa się na podstawie analizy kształtu próbki badanego metalu, kalibracja ma na celu zwiększenie dokładności odwzorowania kształtu obiektu w wyniku procesu segmentacji.

W szczególności skupiono się na kompensacji czułości poszczególnych pikseli matrycy oraz redukcji wpływu termicznej generacji ładunków.

Wykorzystane do prezentacji wyników obrazy, wykonane zostały z użyciem 8-bitowej, monochromatycznej kamery cyfrowej Wat502a firmy WATEC (USA).

2. Zautomatyzowany pomiar właściwości powierzchniowych

Rozważany w niniejszym artykule system wizyjny jest elementem składowym stanowiska pomiarowego THERMO-WET, będącego własnością Katedry Informatyki Stosowa-

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka w Łodzi

nej Politechniki Łódzkiej. Stanowisko umożliwia pomiar napięcia powierzchniowego i kątów zwilżania wybranych metali i ich stopów w temperaturach sięgających nawet 1800°C.

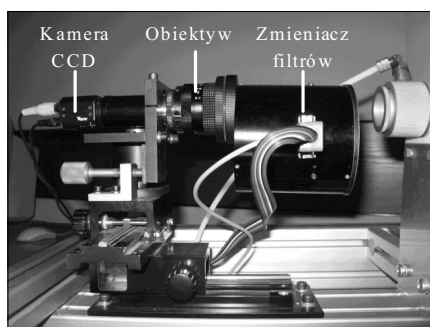
Z uwagi na ograniczony zakres rozpatrywanych zagadnień szczegółowy, opis urządzenia został pominięty. Informacje na jego temat znaleźć można np. w: [7, 10–14].

2.1. System wizyjny

System wizyjny stanowiska THERMO-WET przedstawiony został na rysunku 1.

W jego skład wchodzi:

- monochromatyczna, miniaturowa kamera wizyjna CCD;
- obiektyw;
- zmieniacz filtrów, wykonany specjalnie podczas budowy stanowiska badawczego;
- karty dwuwymiarowego przetwornika A/C (*frame-grabber*);
- pakiet sprzęgający, wykonany specjalnie podczas budowy stanowiska badawczego;
- zaawansowane algorytmy przetwarzania i analizy obrazów.



Rys. 1. System wizyjny stanowiska THERMO-WET

2.2. Metodologia pomiarów

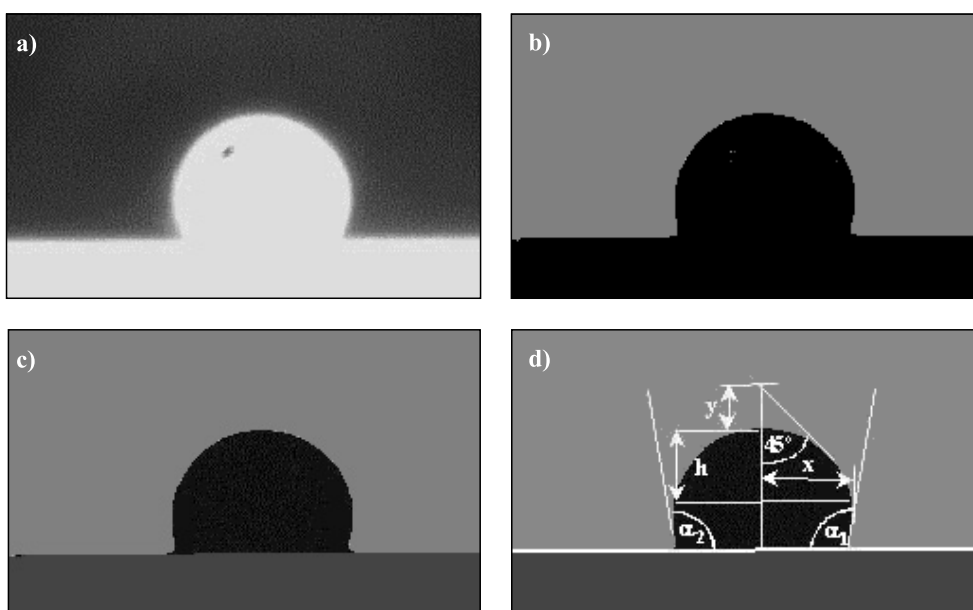
W trakcie procesu pomiarowego, obraz kropli badanego materiału (por. rys. 2a) poddawany jest procesowi segmentacji. W omawianej aplikacji, proces ten składa się z dwóch etapów:

1. oddzielenia próbki wraz z podstawą od tła (rys. 2b),
2. oddzielenia próbki od podłoża (rys. 2c).

W pierwszym etapie segmentacji wykorzystywany jest algorytm progowania z lokalnym, rekurencyjnym doбором progu [4]. Wynikiem tego etapu jest wydzielenie z obrazu jednorodnego obszaru stanowiącego sumę obszarów próbki i podstawy.

Drugi etap segmentacji ma za zadanie oddzielić obszar próbki badanego materiału od obszaru podstawy, na której jest ona umiejscowiona. Zastosowane algorytmy działają w oparciu o wiedzę *a priori* o cechach geometrycznych próbki i podstawy. Podstawowym jest założenie, że górna krawędź podstawy jest linią prostą zbliżoną do poziomej.

Uzyskany w wyniku segmentacji obraz zawiera trzy obszary jednoczerwone: próbkę, podstawę oraz tło. Algorytmy analizy obrazu mają na celu pomiar tych własności geometrycznych obiektów zawartych w obrazie (rys. 2d), które są niezbędne do wyznaczenia napięcia powierzchniowego badanego materiału oraz kąta zwilżania podłoża przez badany materiał z wykorzystaniem wzoru Portera [1, 9].



Rys. 2. Kolejne etapy przetwarzania i analizy obrazów w procesie pomiarowym na stanowisku THERMO-WET: a) obraz oryginalny; b) wynik segmentacji obrazów; c) oddzielenie próbki od podstawy; d) analiza kształtu próbki

Ponieważ zaimplementowane w stanowisku THERMO-WET algorytmy wyznaczające właściwości powierzchniowe bazują na pomiarze geometrycznych parametrów analizowanej próbki, istnieje bardzo silny związek pomiędzy dokładnością segmentacji a wyznaczeniem napięcia powierzchniowego i kątów zwilżania badanego materiału. Jak wspomniano bowiem wcześniej, algorytmy segmentacji mają na celu precyzyjne określenie kształtu próbki.

W związku z powyższym, konieczny jest dobór odpowiednich procedur przetwarzania wstępnego. Wprawdzie w bogatej literaturze przedmiotu zdefiniowanych zostało wiele algorytmów przetwarzania wstępnego, jednak w większości przypadków są one niewystarczające do praktycznego wykorzystania w przedstawionym systemie analizy ilościowej obrazów. W wyniku ich zastosowania często następuje utrata części istotnej informacji obrazowej, w szczególności jest to rozmycie krawędzi obiektów widocznych na scenie, znacznie utrudniająca ich precyzyjną lokalizację.

Utrata istotnej informacji obrazowej w procesie przetwarzania wstępnego wynika z faktu, że większość znanych algorytmów poprawy jakości obrazu zwykle nie uwzględnia ani charakteru zakłóceń wnoszonych do obrazów przez elementy składowe systemów wizyjnych, ani specyfiki obrazów stanowiących podstawę procesu pomiarowego. Warunki te spełnia natomiast procedura kalibracji przedstawiona w kolejnym rozdziale niniejszego artykułu.

3. Proces kalibracji

Przedstawiony proces kalibracji kamery obejmuje korekcję tych czynników, które wynikają z niedoskonałości matrycy CCD. Dlatego też obejmuje przede wszystkim redukcję degradującego wpływu napięcia podkładowego, szumu ciemnego oraz nierównomiernego rozkładu czułości poszczególnych elementów światłoczułych. Dodatkowo, zamieszczony opis uzupełniony został o informacje nt. metody detekcji i korekcji gorących i martwych pikseli.

3.1. Korekcja szumu

Szumem w obrazie cyfrowym nazywany jest dodatkowy, niepożądany sygnał, który dodaje się do ładunków wygenerowanych pod wpływem padającego na matrycę CCD światła i zmienia tym samym jasność pikseli w obrazie wynikowym. Można natomiast przyjąć, że źródłem sygnału zakłócającego jest jeden z następujących czynników [2, 3, 6, 8]:

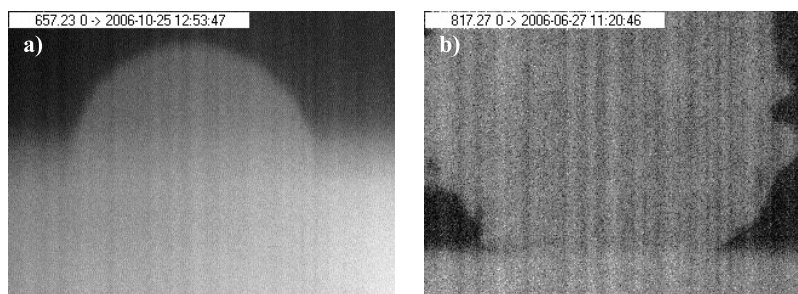
- losowe fluktuacje w fotonowym sygnale (szum fotonowy, *photon noise*);
- obecność sygnału podkładowego (*bias signal*);
- samoczynna, termiczna generacja ładunków (szum ciemny, *dark current*);
- błędy odczytu raz błędy kwantyzacji sygnału (szum odczytu, *readout noise*).

Szum termiczny wraz z sygnałem podkładowym tworzą tzw. tło instrumentalne obrazu.

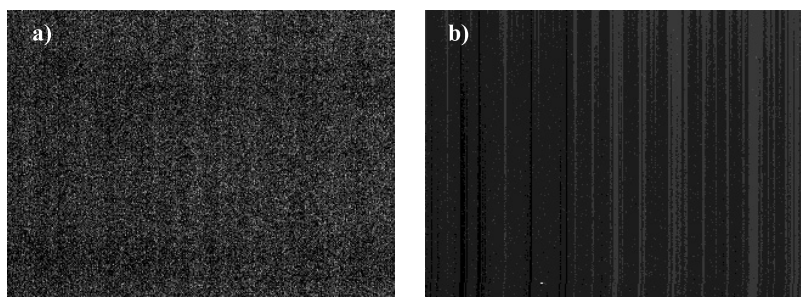
Obecność szumów może w znacznym stopniu pogorszyć jakość obrazu cyfrowego. W szczególności, obecność tła instrumentalnego może okazać się poważnym problemem. Ilustruje to rysunek 3. Przedstawiono na nim obrazy rozgrzanych próbek aluminium (rys. 3a) oraz miedzi (rys. 3b). Widoczne na obrazach pionowe linie o zmiennej jasności wynikają właśnie z obecności tła instrumentalnego i wskazują na sposób odczytu testowanej matrycy CCD. Z uwagi na nierównomierny rozkład jasności w obszarze obiektu, proces segmentacji obrazu jest utrudniony.

Do budowy przybliżonego obrazu tła instrumentalnego należy wykorzystać tzw. ciemne klatki, czyli obrazy wykonane przy zamkniętym obiektywie. Ponieważ w takiej konfiguracji na obiektyw nie pada światło, zarejestrowana klatka przedstawia obraz powstały w wyniku zsumowania napięcia podkładowego, termoladunków oraz pewnych losowych zakłóceń. Tło instrumentalne można przybliżyć albo w wyniku prostego uśrednienia wielu ciemnych klatek lub metodą ekstrakcji kolejnych składowych jasności w sposób opisany w [5].

Przykładową ciemną klatkę przedstawiono na rysunku 4a. Rysunek 4b przedstawia przybliżony obraz tła instrumentalnego dla testowanej kamery Wat502a. W celu lepszej prezentacji wyników, histogramy obu obrazów zostały rozciągnięte.

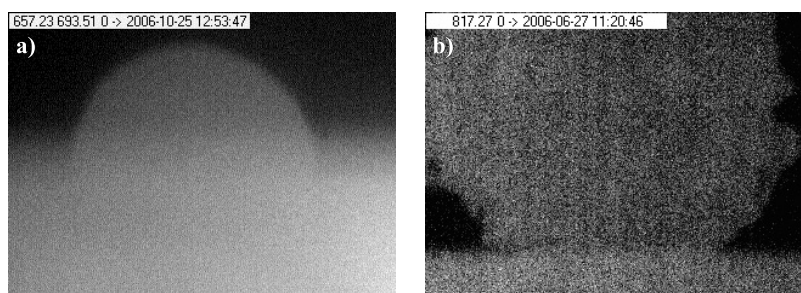


Rys. 3. Pogorszenie jakości obrazu w wyniku obecności tła instrumentalnego:
a) aluminium, temp. 657°C; b) miedź, temp. 817°C



Rys. 4. Ciemne klatki: a) przykładowa ciemna klatka; b) przybliżony obraz tła instrumentalnego.
W celu lepszej prezentacji wyników, histogramy obu klatek zostały rozciągnięte

Korekcja wpływu tła instrumentalnego jest bardzo prosta i polega jedynie na odjęciu jego przybliżenia (rys. 4b), od każdego z pozyskiwanych przez system wizyjny obrazów. Wynik wykonanej w ten sposób korekcji w odniesieniu do przykładowych obrazów z rysunku 3 przedstawiono na rysunku 5.



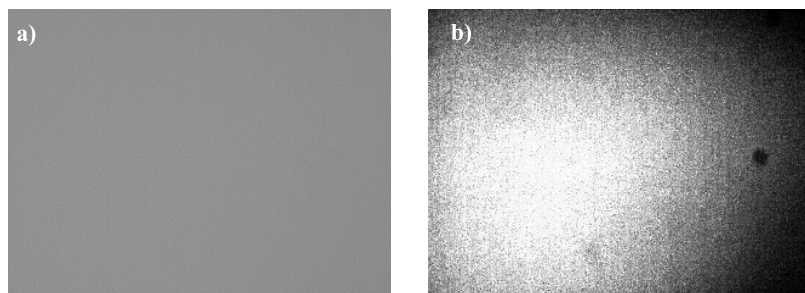
Rys. 5. Korekcja wpływu tła instrumentalnego na jakość obrazu.
Obrazy przed korekcją przedstawione zostały na rysunkach 3a i b

Wyniki korekcji (rys. 5) wyraźnie pokazują, że usunięcie obrazu tła instrumentalnego poprawia jakość obrazów pozyskiwanych w trakcie procesu pomiarowego. W wyniku korekcji znikają z obrazu pionowe „gorące” pasy wskazujące na kierunek odczytu matrycy. W konsekwencji zwiększa się równomierność rozkładu jasności w obrębie tła i obiektu. Dodatnim efektem jest również poprawa kontrastu obrazu.

3.2. Kompensacja różnic czułości pikseli

Bardzo ważnym krokiem kalibracji układu CCD jest kompensacja różnic czułości poszczególnych elementów światłoczułych przetwornika CCD. Różnice te wynikają głównie z jego nieliniowości. Liniowość odnosi się do sposobu rejestrowania światła przez detektor CCD i oznacza wprost proporcjonalną zależność ilości fotoładunków zgromadzonych w elementach światłoczułych przetwornika CCD do natężenia padającego na nie promieniowania. Analogiczna zależność dotyczy również sygnału cyfrowego odpowiadającemu każdemu z pikseli.

Najprostszym sposobem analizy rozkładu czułości pikseli jest wykonanie tzw. mapy wzmocnienia, czyli obrazu zarejestrowanego przy równomiernym oświetleniu detektora CCD światłem o stałym natężeniu. Występujące w takim obrazie fluktuacje jasności ujawniają różnice czułości poszczególnych elementów światłoczułych przetwornika CCD. Przykładową mapę wzmocnienia (obraz oryginalny oraz efekt rozciągnięcia histogramu) przedstawiono na rysunku 6. Powstała ona w wyniku uśrednienia wielu klatek równomiernie oświetlonej powierzchni, wykonanych dla różnej lokalizacji źródła światła oraz odjęcia tła instrumentalnego (por. rys. 4b). Uśrednienia dokonano celu eliminacji szumów o charakterze losowym.



Rys. 6. Mapa wzmocnienia: a) obraz oryginalny; b) wynik rozciągnięcia histogramu

Należy zaznaczyć, że w oryginalnej mapie wzmocnienia (rys. 6a), wahania jasności nie przekraczają czterech poziomów.

Kompensacja różnic czułości wykonywana jest poprzez podzielenie obrazu przez mapę wzmocnienia zgodnie z zależnością

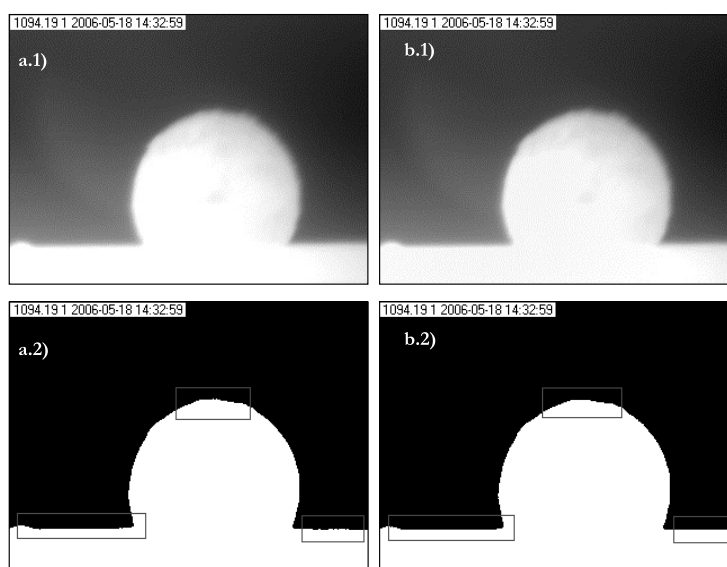
$$L' = \bar{L}_{ff} \frac{L - L_b}{L_{ff} - L_b} \quad (1)$$

gdzie:

- L' – obraz wynikowy (po korekcji),
- L – obraz źródłowy,
- L_b – ciemna klatka (tło instrumentalne),
- L_{ff} – mapa wzmocnienia,
- \bar{L}_{ff} – średnia jasność mapy wzmocnienia.

Zarówno klatka ciemna, jak i mapa wzmocnienia powinny być wykonane w warunkach (wzmocnienie, czas ekspozycji, temperatura otoczenia itp.) jak najbardziej zbliżonych do tych, w jakich wykonywane było zdjęcie oryginalne.

Wpływ kalibracji kamery CCD wykonanej w omówiony powyżej sposób, przedstawiono na rysunku 7. Z uwagi na kluczowe znaczenie dla procesu pomiarowego, jako kryterium jakości obrazu przyjęto dokładność odwzorowania kształtu obiektu w wyniku segmentacji. Do segmentacji wykorzystany został algorytm progowania z lokalnym iteracyjnym wyborem progu [4], zaimplementowany w stanowisku pomiarowym THERMO-WET. Widoczne na obrazach ramki podkreślają istotne (z punktu widzenia dalszej analizy kształtu) szczegóły.



Rys. 7. Wpływ kompensacji różnic czułości na jakość obrazu: a) obrazy oryginalne, miedź, 1094°C; b) efekt kompensacji; 1) – obraz przed segmentacją, 2) – wynik segmentacji. Ramki podkreślają istotne szczegóły w odwzorowaniu kształtu

Analiza obrazów przedstawionych na rysunku 7 wskazuje, że kompensacja różnic czułości poszczególnych pikseli w matrycy dodatkowo wpływa na jakość obrazu. W przypadku obrazów oryginalnych poprawa jakości wydaje się znikoma i przejawia się głównie wyrównaniem rozkładu jasności w obszarze tła obrazu oraz niewielką poprawą kontrastu.

Skala faktycznej poprawy jakości obrazu widoczna jest dopiero po procesie segmentacji. Zastosowanie kompensacji różnic czułości w procesie przetwarzania wstępnego, wpływa na zwiększenie regularności krawędzi w obiekcie i podstawie po segmentacji. W konsekwencji zwiększona zostaje dokładność odwzorowania kształtu. Należy podkreślić, że są to zmiany bardzo istotne z punktu widzenia algorytmów obliczających napięcie powierzchniowe oraz kąty zwilżania, które aproksymują profil próbki oraz linię podstawy.

3.3. Martwe i gorące piksele

Jak wspomniano wcześniej, poszczególne piksele w matrycy mogą charakteryzować się m.in. różnymi czułościami. Różnice te są zazwyczaj niewielkie i wynikają głównie z minimalnych różnic rozmiarów detektorów. Zdarzają się jednak i takie piksele, które charakteryzują się czułością znacznie odbiegającą od przeciętnej, co może objawiać się zarówno nadmierną reakcją na światło (tzw. gorące piksele), jak i zupełnym jej brakiem (tzw. martwe piksele).

Gorące piksele na zdjęciach objawiają się jako pojedyncze punkty, znacznie jaśniejsze niż otoczenie. Można je wykryć poprzez wykonanie operacji progowania ciemnej klatki, jedną z największych występujących w niej jasności. Wynikiem takiej operacji będzie mapa wskazująca na punkty obrazu o największej jasności.

Detekcja martwych pikseli jest również koncepcyjnie bardzo prosta. Ponieważ są one zupełnie nieczułe na światło, w miejscu takiego uszkodzonego piksela, w obrazie zawsze wystąpi czarny (w przypadku kamery monochromatycznej) punkt. Położenie takiego punktu będzie stałe, niezależnie od utrwalonej sceny. W celu wykrycia martwych pikseli wystarczy więc dodać różne zdjęcia wykonane z wykorzystaniem badanej kamery, a następnie na ich średniej wykonać operację progowania z progiem równym 0. Efektem takiego działania będzie mapa martwych pikseli mówiąca, które punkty obrazu należy skorygować.

Korekcji gorących i martwych pikseli dokonać można, np. zastępując ich jasność medianą pikseli sąsiadujących.

4. Wnioski

W artykule opisany został proces kalibracji kamery CCD. W przedstawionym ujęciu kalibracja rozumiana jest jako sprowadzanie odpowiedzi matrycy CCD do zależności liniowej, czyli wprost proporcjonalnej do natężenia padającego na matrycę światła. Główna uwaga skupiona została więc na kompensacji różnic czułości poszczególnych pikseli oraz eliminacji sygnału podkładowego i prądu ciemnego.

Ponadto, przedstawiony został wpływ poszczególnych etapów kalibracji na jakość obrazów pozyskiwanych w trakcie wykonywania eksperymentów na stanowisku THERMO-WET, do wysokotemperaturowych pomiarów właściwości powierzchniowych metali. Zaprezentowane wyniki wykazują, że zastosowanie opisanej techniki w procesie przetwarzania wstępnego, poprawia jakość wyników osiąganych w kolejnych etapach procesu pomiarowego.

Przedstawiona technika może być z powodzeniem stosowana w różnych aplikacjach pomiarowych przetwarzania i analizy obrazów.

Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego oraz Budżetu Państwa w ramach programu Mechanizm WIDDOK (nr umowy Z/2.10/II/2.6/04/05/U/2/06).

Literatura

- [1] Adamson A. W., Gast A. P.: *Physical Chemistry of Surfaces*. Wiley-Interscience, Los Atlas, California, 1997
- [2] Beletic J. W., Amico P. (eds.): *Optical Detectors for Astronomy*. Proceedings of the Third ESO CCD Workshop, Garching bei München 1996
- [3] Beletic J.W, Amico P.: *Scientific Detectors for Astronomy: The Beginning of a New Era*. Springer, Berlin, 2004
- [4] Fabijańska A.: *Algorytmy segmentacji w systemach analizy ilościowej obrazów*. Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka, Łódź 2006 (Praca magisterska)
- [5] Sankowski D., Fabijańska A.: *CCD Camera Instrumental Background Estimation Algorithm*. Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC, Warszawa, paper #7407, 2007
- [6] Howell B.: *Handbook of CCD astronomy*. Cambridge University Press, Cambridge 2006
- [7] Jeżewski S.: *Konstrukcja oprogramowania dla przemysłowych systemów analizy i przetwarzania obrazów*. Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka, Łódź 2005
- [8] Martínez P., Klotz A.: *A practical guide to CCD astronomy*. Cambridge University Press, Cambridge 1998
- [9] Missol W.: *Energia powierzchni rozdziału faz w metalach*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1974
- [10] Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S.: *Image processing in physical parameters measurement*. 16th IMEKO World Congress, Vienna, Austria, 2000, 277–283
- [11] Sankowski D., Senkara J., Strzecha K., Jeżewski S.: *Automatic investigation of surface phenomena in high temperature solid and liquid contacts*. Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC, Budapest, Hungary, 2001, 1397–1400
- [12] Sankowski D., Senkara J., Strzecha K.: *Computerized system for assessment of quality of solders*. IEEE The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Proceedings of the VIIth International Conference CADSM, Lviv-Slavske, Ukraine, 2003, 56–58
- [13] Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S.: *Algorytmy przetwarzania i analizy obrazów w wysokotemperaturowych pomiarach własności fizykochemicznych wybranych materiałów*. Zeszyt jubileuszowy X lat KIS, Łódź 2005, 51–70
- [14] Strzecha K.: *Zastosowanie przetwarzania i analizy obrazów w wysokotemperaturowych pomiarach własności fizykochemicznych wybranych materiałów*. Wydział Elektrotechniki i Elektroniki, Politechnika Łódzka, Łódź 2002 (Rozprawa doktorska)