

Piotr Sawicki  
Bogusław Więcek

## CYFROWY SYSTEM VIDEO TERMALNY DLA APLIKACJI W BLISKIM ZASIĘGU

### 1. Wstęp

W różnych dziedzinach techniki i przemysłu istnieje coraz większe zapotrzebowanie na optyczne metody pomiaru, kontroli i monitoringu. Obecny poziom i stan rozwoju cyfrowych technik rejestracji, metod przetwarzania obrazów cyfrowych i ekstrakcji informacji o mierzonym obiekcie jednoznacznie określają kierunki rozwoju fotogrametrycznych systemów bliskiego zasięgu. Obserwowana tendencja wzajemnego wpływu i przenikania się tych zagadnień widoczna jest w ostatnich latach szczególnie w technice pomiarowej bliskiego zasięgu [7]. Oferowane obecnie komercyjne, w przeważającej większości cyfrowe systemy pomiarowe, różnią się architekturą i osiąganymi, które wynikają z różnych zadań i wymagań stawianych tym konstrukcjom. Ze względu na różnorodność proponowanych rozwiązań trudno jest jednak dokonać ich oceny i porównania w oparciu o jednolite kryteria i standardy.

Konstrukcja i opracowanie metrologicznego wizyjnego systemu pomiarowego musi uwzględniać wiele czynników i założeń projektowych, wpływających na ostateczne parametry techniczne systemu. Podstawowe kryteria konstrukcyjne powinny uwzględniać :

- przeznaczenie systemu;
- rodzaj i szybkość rejestrowanych procesów kinematycznych;
- wymiary i tekstura obiektu;
- zasięg i zakres spektralny rejestracji;
- rodzaj i parametry techniczne zastosowanych sensorów;
- tryb i czas pomiaru oraz opracowania;
- zakres i dokładność opracowania;
- rodzaj i forma przedstawienia wyników;
- tryb pracy użytkownika z systemem;
- łatwość obsługi systemu;
- wzajemna relacja ceny do osiągnięć systemu ;

Współczesny fotogrametryczny cyfrowy system pomiarowy powinien składać się z kamer cyfrowych, stacji roboczej lub komputera klasy PC, oprogramowania do akwizycji danych, przetwarzania obrazów i rekonstrukcji 3D obiektu wraz z modułem równoczesnej kalibracji kamer [1], [2], [3] [6], [7]. Charakteryzować się powinien w zależności od przeznaczenia, dużą szybkością pozyskiwania i przetwarzania danych cyfrowych, w miarę możliwości wysokim stopniem zautomatyzowania, funkcjonalnością i uniwersalnością.

## 2. Koncepcja cyfrowego systemu video termalnego

Prezentowany system video termalny dla aplikacji w bliskim zasięgu jest wynikiem realizacji koncepcji opracowania „low cost” („taniego”) multisensoralnego fotogrametrycznego systemu cyfrowego opartego na bazie komputera klasy PC (projekt badawczy KBN - GRANT Nr 9T12E 01808). Założenia tego projektu uwzględniły wcześniejsze doświadczenia zdobyte przy opracowaniu niezależnych systemów termalnego i wizyjnego w ramach współpracy między Katedrą Fotogrametrii i Teledetekcji Akademii Rolniczo Technicznej w Olsztynie i Instytutem Elektroniki Politechniki Łódzkiej [4], [5], [8], [9]. Prezentowany system jest więc rozwiązaniem nowej generacji. Przyjęte i w ramach badań praktycznie zrealizowane założenia charakteryzują :

- integracja kilku (max. 4-ch) kamer CCD i jednej termalnej na bazie wspólnej karty frame grabber w jeden hybrydowy system;
- konstrukcja nowej jakości kart frame grabber ;
- możliwość rejestracji procesów dynamicznych, szybkozmiennych;
- równoległe cyfrowe przetwarzanie obrazów wizyjnych i termalnych;
- pozycjonowanie 2D i 3D razem z opracowaniem termalnym;
- zastosowanie nowoczesnych standardów techniki komputerowej;
- modułarna (obiektowa) struktura oprogramowania;
- otwarta architektura wynikająca z pracy w środowisku wielozadaniowym, jakim jest Windows'95 i Windows NT.

System ten umożliwi użytkownikowi równoległą, synchroniczną rejestrację sensorami optyczno-elektronicznymi i termalnym w „czasie rzeczywistym”, natychmiastowe wykonanie przetwarzania, analizę, pomiar, archiwizację obrazów i ekstrakcję informacji.

Należy podkreślić, że oferowane obecnie na rynku, np. przez firmę Inframetric, komercyjne systemy termowizyjne są systemami zorientowanymi przede wszystkim na opracowania termograficzne. Są systemami bardzo drogimi, mają konfigurację opartą tylko na jednym sensorze termalnym i jednym optyczno-elektronicznym o wyjściu analogowym z magnetowidowym zapisem obrazów. Struktura ich oprogramowania jest zamknięta i nie zawiera fotogrametrycznych metod opracowania na podstawie zarejestrowanych obrazów.

## 3. Architektura systemu

Realizując sformułowane założenia konstrukcyjne i aplikacyjne systemu, zdecydowano się ze względów finansowych na zastosowanie stosunkowo tanich monochromatycznych kamer CCD firmy Panasonic, które są powszechnie stosowane w systemach telewizji użytkowej. Kamery Panasonic WV-BP312 wyposażone są w przetwornik CCD 1/3” nowej generacji z mikrosoczewkami zwiększającymi czułość. Generują na wyjściu analogowy sygnał telewizyjny w standardzie CCIR w międzyliniowym trybie transmisji ramek (ang. *Interline Transfer*). Wymiar matrycy przetwornika wynosi 4.8 (H) x 3.6(V) mm<sup>2</sup>, natomiast rozdzielczość 753(H) x 582 (V). Kamery zostały wyposażone w wymienne obiektywy z ręczną regulacją przysłony o ogniskowej 6 mm i 12 mm.

Posiadana przez ART w Olsztynie od 1987 r. kamera termalna AGEMA LWB 880 jest kamerą starszej generacji o analogowym sygnale wyjścia. Nominalna rozdzielczość

dedektora podczerwieni (tellurek rtęciowo-kadmowy fotoprzewodzący MCT) wynosi 175 x 280 pikseli, zakres widmowy rejestrowanego promieniowania wynosi 8-12  $\mu\text{m}$ , czułość – 0.07° C przy temperaturze obiektu 30° C. Obiektyw o kącie widzenia 20° pozwala zobrazować powierzchnię 3.2 x 3.2 m<sup>2</sup> przy odległości rejestracji 10m.

Podstawowym komponentem systemu cyfrowego o ciągłym i przewodowym trybie przesyłania sygnału z sensorów jest interfejs lub inaczej karta sterująca (ang. *Frame Grabber* - FG), która umożliwi stałe sprzężenie z sensorami i współpracuje z magistralą komputera. Konstrukcja karty frame grabber (FG) i wynikające z niej parametry techniczne określają sposób akwizycji i przetworzenia obrazów do postaci cyfrowej oraz szybkości zapisu i transferu danych do komputera. Uwzględniając pierwotną rozdzielczość matrycy sensorów optyczno-elektronicznych i dedektora termalnego założono, że podstawowa robocza rozdzielczość systemu po digitalizacji obrazów będzie dla obrazów wizyjnych odpowiadać standardowi grafiki komputerowej VGA tj. 640 x 480, natomiast dla obrazu termalnego 272 x 286 z poczwórnym przeplotem, w obu przypadkach z kwadratowym pikselem.

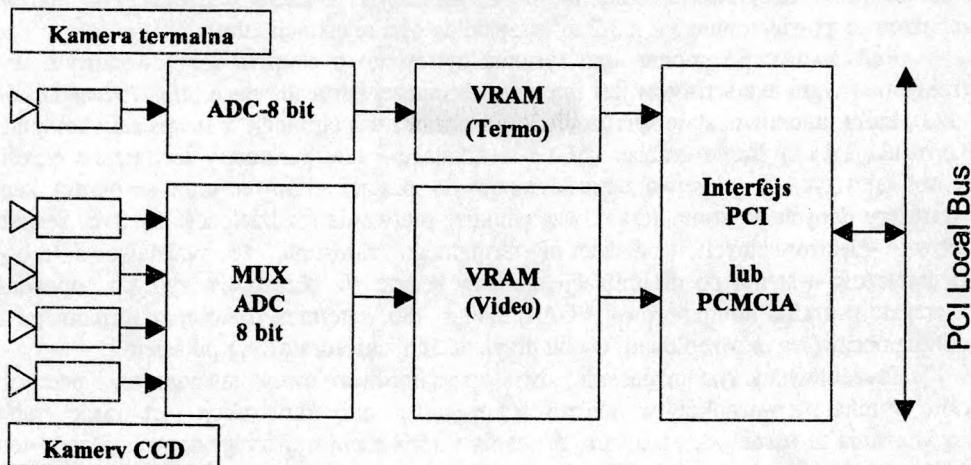
Prezentowany system posiada dwie opcje hardware'owe – stacjonarną i przenośną, które wynikają z warunków technicznych powstałych przy konstrukcji kart frame grabber. Rozwiązania te różnią się platformą działania i szybkością transmisji danych. Dzięki temu, system zyskuje na uniwersalności zastosowania, gdyż w zależności od cech metrologicznych obiektu, warunków i parametrów rejestracji, możliwe są do zrealizowania odpowiednio dwie niezależne konfiguracje sprzętowe systemu.

Wersja stacjonarna oparta jest na host komputerze klasy PC - Pentium ze standardową obecnie magistralą PCI (ang. *Peripheral Computer Interconnect*). Karta frame grabber działa jako wewnętrzna, wsadowa karta umieszczana w jednym z wejść PCI komputera. Istotną zaletą tego rozwiązania opartego na nowym standardzie PCI jest duża szybkość przesyłania 32-bitowych danych w trybie potokowym (ang. *burst*), dochodząca do 132MB/s przy częstotliwości najczęściej stosowanego zegara szyny PCI wynoszącym 33MHz oraz automatyczny tryb konfiguracji „*Plug-and-Play*”.

Wersja przenośna, znacznie wolniejsza, dostosowana jest również do standardu PCI i oparta jest na komputerze typu Notebook – Pentium, który jest standardowo wyposażony w gniazdo PCMCIA. Ze względu na swoje wymiary zewnętrzne, karta frame grabber nie mogła zostać umieszczona we wnętrzu komputera przenośnego. Opracowany i wykonany został więc drugi egzemplarz karty FG, który umieszczony jest w niezależnej, specjalnie wykonanej obudowie. Połączenie z komputerem następuje za pomocą przewodu i karty PCMCIA (DAQCard-DIO-24 firmy National Instruments). W konsekwencji, w tym rozwiązaniu transmisja danych cyfrowych odbywa się znacznie wolniej, z prędkością najwyższej do kilkunastu MB/s.

Omawiane karty frame grabber są oryginalnym opracowaniem, zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Posiadają cztery niezależne wejścia dla zespolonego sygnału analogowego video (CCIR) z kamer CCD oraz jedno analogowe wejście dla kamery termalnej. W torze wizyjnym znajduje się multiplexer analogowy, transferujący kolejne obrazy z odstępem co 20ms oraz szybkie 8-bitowe układy przetwarzania analogowo-cyfrowego A/D. Zastosowane nowoczesne układy pamięci VRAM do aplikacji multimedialnych, działające w trybie FIFO (ang. *First-In-First Out*) - odczyt i zapis obrazu odbywa się sekwencyjnie, pozwalają na szybki, co ca 160 ms zapis obrazów termalnych (100kB/obraz) i videosekwencji (300kB/obraz) przy typowej dla systemu rozdzielczości 640 x 480, w 256 dyskretnych poziomach szarości. Zapewniają również dużą

szybkość przesyłu obrazów do pamięci komputera nadrzędnego. Do obsługi sterowania pamięcią VRAM i transmisji danych użyto programowalnych układów FPGA firmy XILINX.



Rys. 1: Schemat blokowy architektury systemu

Omawiane karty frame grabber są oryginalnym opracowaniem, zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Posiadają 4-y niezależne wejścia dla zespolonego sygnału analogowego video (CCIR) z kamer CCD oraz jedno analogowe wejście dla kamery termalnej. W torze wizyjnym znajduje się multiplexer analogowy, transferujący kolejne obrazy z odstępem co 20ms oraz szybkie 8-bitowe układy przetwarzania analogowo-cyfrowego A/D. Zastosowane nowoczesne układy pamięci VRAM do aplikacji multimedialnych, działające w trybie FIFO (ang. *First-In-First Out*) - odczyt i zapis obrazu odbywa się sekwencyjnie, pozwalają na szybki, co ca 160 ms zapis obrazów termalnych (100kB/obraz) i videosekwencji (300kB/obraz) przy typowej dla systemu rozdzielczości 640 x 480, w 256 dyskretnych poziomach szarości. Zapewniają również dużą szybkość przesyłu obrazów do pamięci komputera nadrzędnego. Do obsługi sterowania pamięcią VRAM i transmisji danych użyto programowalnych układów FPGA firmy XILINX.

Jakość geometryczna obrazu video generowanego w procesie digitalizacji za pomocą kart FG ma podstawowe znaczenie dla przetwarzania obrazów cyfrowych i dokładności fotogrametrycznego opracowania analitycznego. Decyduje o tym układ generacji sygnału zegarowego (próbkującego) i synchronizacja z impulsami odchylenia w kamerach CCD. Dla torów wizyjnych zastosowano więc cyfrową pętlę sprzężenia fazowego DPLL (ang. *Digital Phase Locked Loop*) o częstotliwości oscylatora 80MHz, dzięki czemu uzyskano częstotliwość próbkowania 14.545 MHz. Uwzględniając rzeczywisty wymiar matrycy CCD i jego nominalną rozdzielczość oraz rozdzielczość aktywnej części obrazu po digitalizacji otrzymano quasi kwadratowy piksel o wymiarach  $p'_x = 6.3 \mu\text{m}$  i  $p'_y = 6.2 \mu\text{m}$ . Zastosowana cyfrowa pętla sprzężenia fazowego zapewnia wystarczającą jakość synchronizacji i w efekcie w istotny sposób eliminuje zniekształcenia liniowe obrazu cyfrowego. Błąd przesunięcia pikseli w linii (ang. *line jitter*) został w ten sposób zminimalizowany do wartości 18.2 % wymiaru piksela, co odpowiada ca 1.0  $\mu\text{m}$ .



W celu pełnego wykorzystania parametrów użytkowych opracowanych kart frame grabber i zapewnienia ich optymalnej pracy w środowisku systemowym komputera opracowane zostały specjalne sterowniki (ang. *drivers*). Umożliwiają one automatyczne wykrycie kart FG, ich prawidłową inicjację w systemie i komunikację ze środowiskiem aplikacyjnym. Dzięki pracy na najniższym poziomie bezpieczeństwa możliwa jest przyspieszona transmisja danych oraz realizowany programowo podgląd i rejestracja w czasie rzeczywistym obrazów wizyjnych i termalnych.

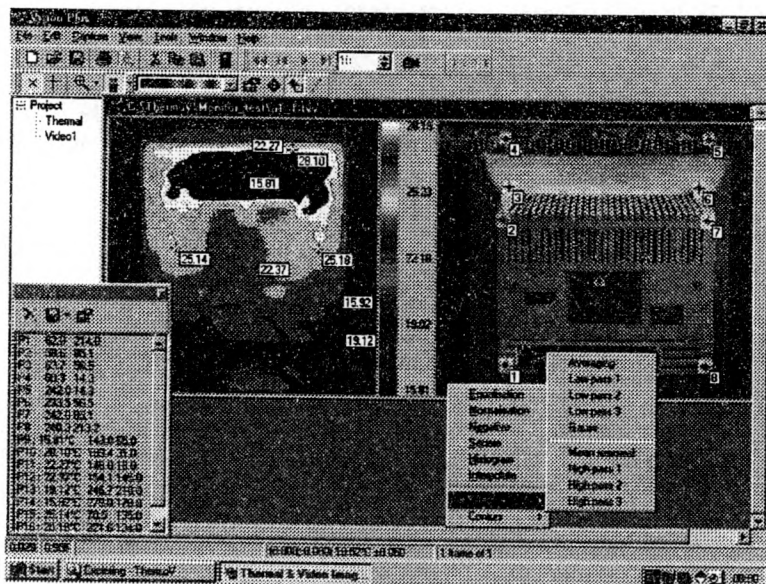
#### 4. Oprogramowanie sterujące i aplikacyjne

Opracowane oprogramowanie o nazwie VISION PLUS obsługuje i zarządza pracą kart FG oraz posiada zaimplementowane procedury przetwarzania, analizy i pomiaru obrazów cyfrowych. Tworzy niezależny moduł, 32-bitową aplikację, która pracuje w środowisku operacyjnym Windows'95 lub Windows NT, wykorzystując ich multimedialne funkcje. Jest oprogramowaniem w pełni obiektowym, napisanym w języku Delphi i C++. Użytkownik wybiera funkcje programu z menu głównego, rozwijanego podmenu, okien dialogowych oraz pasków narzędziowych uaktywniających się w zależności od dostępu do zawartych w nich funkcji. Program VISION PLUS realizuje następujące bloki funkcji (w zestawieniu wymieniono tylko podstawowe):

- akwizycja obrazów cyfrowych w dowolnej konfiguracji kamer CCD i termalnej oraz o dowolnych parametrach rejestracji tj. tryb, rozdzielczość, liczba sekwencji, interwał;
- wizualizacja i przeglądanie na ekranie zarejestrowanych obrazów i sekwencji;
- preprocessing obrazów cyfrowych;
- cyfrowe przetwarzanie obrazów wizyjnych i termalnych;
- pomiar 2D współrzędnych pikselowych;
- ilościowy i jakościowy pomiar wartości temperatur;
- przekształcenie rzutowe 2D obrazów termalnych i wizyjnych;
- operacje dyskowe.

W oprogramowaniu zostały zaimplementowane operatory cyfrowego przetwarzania obrazów wizyjnych i termalnych – filtrowanie, wyrównanie histogramu, kontrastowanie, konturowanie, interpolacja, wyznaczanie histogramów. Zaawansowane funkcje obróbki obrazów cyfrowych obejmują: paletowanie (zmiana kolorów i odcieni), zoom'owanie, zmiana skali i wzajemne nakładanie (miksowanie) odpowiadających sobie obrazów termalnych i wizyjnych oraz przekształcenie rzutowe 2D obrazów. Pakiet opcji pomiarowych umożliwia pomiar współrzędnych pikselowych, analityczne przekształcenie rzutowe 2D, odczytanie wartości temperatur dla dowolnego punktu, rozkładu temperatur dla dowolnie określonego przekroju na termogramie, wyznaczenie emisyjności i korekcję pomiaru temperatury, zmianę definiowania krzywej kalibracji. Możliwe jest również uwzględnienie parametrów kamery termalnej - ogniskową obiektów, aperturę, kalibrację kamery i otoczenia obiektu - temperaturę otoczenia, emisyjność obiektu i źródła referencji.

Oprogramowanie systemowe VISION PLUS zapisuje pliki we własnym formacie tvv. Pozwala również na import i eksport plików w standardowym formacie bmp, dzięki czemu możliwe jest opracowanie termowizyjne obrazów cyfrowych o dowolnej praktycznie rozdzielczości pozyskanych innymi sensorami.



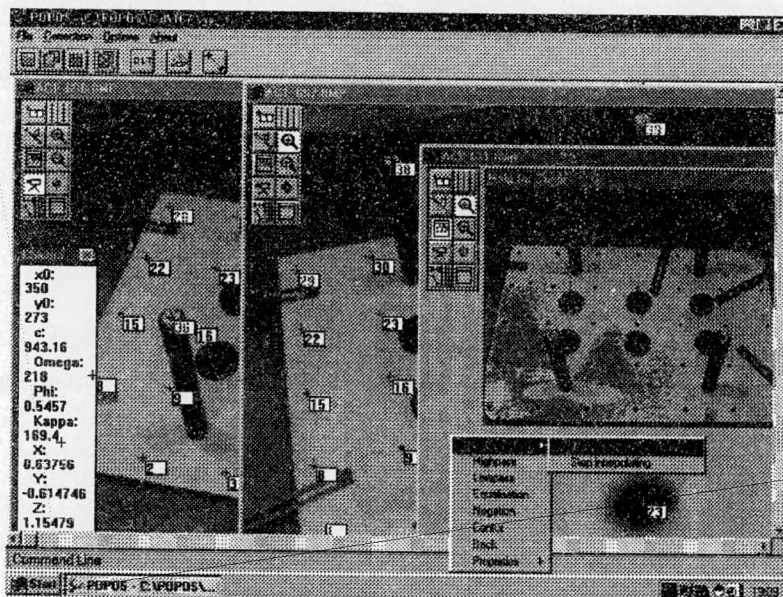
Rys. 2: Okno programu VISION PLUS z sekwencją obrazu termalnego i wizyjnego

Oprócz głównego oprogramowania sterującego i zarządzającego pracą systemu opracowany został program o nazwie POPOS (akronim od słów ang. *POint's POSitioning*). Przeznaczony jest przede wszystkim do pozycjonowania 3D sygnalizowanych, strukturalnych punktów obiektu na podstawie obrazów cyfrowych oraz opcjonalnie do kalibracji lub samokalibracji systemu. Jest to oddzielny, wielofunkcyjny pakiet fotogrametryczny, który może być użytkowany również niezależnie od systemu video termalnego, wykorzystując obrazy pozyskane innymi kamerami cyfrowymi lub zeskanowane zdjęcia na podłożu fotograficznym. Działając jako aplikacja w środowisku Windows (oprogramowanie obiektowe napisane w języku C++) może komunikować się bez problemów z modułem VISION PLUS, dzięki czemu możliwy jest natychmiastowy import plików. Formatem roboczym jest format bmp. Rozbudowany system menu, podmenu, okien dialogowych i aktywacji menu klawiszami myszy pozwala użytkownikowi w trybie interaktywnym na wybór określonych funkcji i opcji opracowania fotogrametrycznego.

Program POPOS pozwala realizować interaktywnie następujące procedury w procesie fotogrametrycznego 3D pozycjonowania :

- wprowadzenie parametrów wejściowych dla realizacji projektu;
- preprocessing obrazów cyfrowych;
- określenie położenia fotopunktów, zdefiniowanie obserwacji dodatkowych i nowo wyznaczanych punktów na kolejnych obrazach (manualnie lub automatycznie);
- wprowadzenie współrzędnych dla fotopunktów i obserwacji dodatkowych;
- pomiar współrzędnych pikselowych na wszystkich obrazach (w trybie manualnym lub automatycznie);
- kalibracja kamer (opcjonalnie);
- pozycjonowanie 3D + samokalibracja „on the job” (opcjonalnie).

Pomiar współrzędnych pikselowych może być wykonany kursorem myszy w trybie manualnym, poprzez wielokrotny pomiar i automatyczne uśrednienie wyników pomiaru lub w trybie automatycznym z wykorzystaniem zaimplementowanej metody korelacji LSM (ang. *Least Squares Matching*) opartej na metodzie najmniejszych kwadratów. Wyznaczanie współrzędnych 3D obiektu lub proces kalibracji (samokalibracji) kamery może być w zależności od warunków rejestracji i rozwiązania realizowany metodą DLT (ang. *Direct Linear Transformation*) lub metodą wiązek. Ścisłe rozwiązanie może uwzględniać dodatkowe obserwacje geodezyjne w przestrzeni obiektu.



Rys. 3: Okno programu POPOS z 3 obrazami zarejestrowanymi kamerą CCD

W procesie kalibracji lub samokalibracji modele funkcjonalne metody wiązek i DLT mogą zostać rozszerzone, oprócz elementów orientacji wewnętrznej kamery, o dodatkowe parametry wg modelu Brown'a (1971) lub Torlegard'a (1989) opisujące dystorsję radialną i tangencjalną. Poza tym, w procesie korekcji błędów systematycznych można dołączyć dodatkowe parametry opisujące typowe błędy zniekształcenia obrazu cyfrowego generowanego przez sensory CCD, tj. współczynnik zmiany skali w kierunku x i nieortogonalność osi x i y przetwornika CCD.

## 5. Podsumowanie

Prezentowany system video termalny został opracowany w celu rejestracji, przetwarzania, analizy i pomiaru obrazów cyfrowych z sensorów optyczno-elektronicznych i termalnego. Jego zintegrowana konfiguracja sprzętowa składa się z max. 4-ch kamer CCD i jednej kamery termalnej (AGEMA 880), połączonych z kartą frame grabber i komputerem. Opracowane zostały dwie wersje systemu: stacjonarna - bazująca na komputerze klasy PC-Pentium i przenośna - oparta na komputerze klasy Notebook-Pentium. Oprogramowanie

systemu składa się z pakietu VISION PLUS - sterującego pracą kart FG i służącego do przetwarzania, analizy obrazów termalnych i wizyjnych oraz z programu POPOS do pozycjonowania 3D. Oprogramowanie, dzięki obiektowej strukturze jest otwarte i może współpracować z innymi sensorami, zarówno na poziomie innych kart FG jak i obsługi różnych danych cyfrowych. Oba pakiety są aplikacjami działającymi w środowisku Windows'95 lub Windows NT i umożliwiają pracę w trybie interaktywnym. Potencjalne możliwości zastosowania systemu obejmują szeroki zakres badań i pomiarów metrologicznych oraz termalnych w mikro i bliskim zasięgu, szczególnie w przypadku rejestracji procesów dynamicznych. System umożliwia akwizycję obrazów cyfrowych w trybie on-line, natomiast właściwe opracowanie cyfrowe realizowane jest w trybie off-line. Wyniki opracowania mogą być integrowane z systemami CAD/GIS.

Ostateczna ocena praktycznego zastosowania opisanego systemu, funkcjonalności zaproponowanych przy jego opracowaniu rozwiązań i przede wszystkim dokładności cyfrowych opracowań, będzie możliwa po zakończeniu badań testowych. Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z faktu, że decydujący wpływ na te aspekty oceny będzie miała stosunkowo niska rozdzielczość wyjściowa przetworników CCD i dedektora podczerwieni kamery termalnej. Wyniki tych badań zostaną zaprezentowane w kolejnej publikacji.

## Literatura

1. Beyer H.A. et al., *Quality control in industry with digital photogrammetry*, OMT III, pp. 29-38, Vienna 1995;
2. Dold J., Suilmann G., *Das RolleiMetric 3D Industriemeßsystem*, ZPF 61(2), 50-62, 1993;
3. Kludas T., *Three dimensional surface reconstruction with the Zeiss photogrammetric industrial measurement system InduSURF Digital*, IAPRS 30/5W1, Zurich, pp. 285-291, 1995;
4. Lubecki A., *Rejestracja i opracowania cyfrowe w termalnym systemie komputerowym.*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Systemy informacji Terenowej GIS/LIS oraz analityczne i cyfrowe opracowania w fotogrametrii i teledetekcji, Vol. 1, s. 18/2-7, Kraków 1994;
5. Lubecki A., Więcek B., *ThermalVisual Digital System in the Imagery of Area Phenomena*, ISPRS Vol. XXXI, Part B1, Com. I, pp. 116-120, 1996;
6. Malz R. W., *„Free-flying” 3-D sensors for efficient close range measurement and reverse engineering*, ISPRS Vol. XXXI, Part B5, Com. V, pp. 336-346, 1996;
7. Sawicki P., *Techniki bliskiego zasięgu i widzenie maszynowe*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Pozyskiwanie informacji przestrzennych na podstawie zobrazowań, Vol. 7, s. 69-73, Kraków 1997;
8. Sawicki P., Więcek B., *Generowanie obrazów cyfrowych za pomocą kamer CCD i karty frame grabber w fotogrametrycznym systemie cyfrowym*, VIII Sesja Naukowo Techniczna, s.101-107, Olsztyn 1995;
9. Sawicki P., Więcek B., *CCD Multicameras Interactive System for Close Range Photogrammetric Applications*, ISPRS Vol. XXXI, Part B5, Com. V, pp.512-515, 1996.

Recenzował: prof. dr hab. inż. Jerzy Bernasik