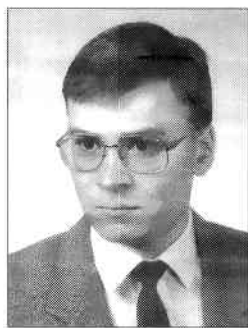


Mirosław GAJER

KATEDRA AUTOMATYKI AGH KRAKÓW

System automatycznej kontroli jakości produkcji z układem wizyjnym

Dr inż. Mirosław GAJER – ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Elektroniki i Informatyki, o specjalności aparatura elektroniczna, w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w 1996 r. Tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie informatyka uzyskał na tym samym Wydziale w roku 2000. Obszarem jego obecnych zainteresowań i działalności badawczej pozostaje technika obliczeń równoległych, systemy wieloprocesorowe oraz metody sztucznej inteligencji – zwłaszcza systemy automatycznego rozpoznawania obiektów, bazujące na układach wizyjnych.



Streszczenie

W artykule rozważono możliwości wykorzystania wieloprocesorowego układu TMS320C80 do konstrukcji systemu wizyjnego, sprawującego automatyczną kontrolę nad jakością produkcji. Przedstawiono propozycję wykorzystania rozważanego systemu wizyjnego w przemyśle farmaceutycznym do eliminowania z linii produkcyjnej tabletek posiadających widoczne uszkodzenia mechaniczne. Omówiono szczegółowo wszystkie operacje wykonywane na obrazach badanych tabletek oraz zamieszczono wyniki eksperymentów mających na celu wykrycie tabletek uszkodzonych. Przeprowadzono także analizę uwarunkowań czasowych, występujących w rozważanym systemie.

Abstract

In the paper the possibility of the usage of the TMS320C80 multiprocessor system for the construction of a vision system for the automatic production quality control was discussed. The proposed vision system is to be used in the pharmacy factory to eliminate medicines with some mechanical defects. All the image processing operations were thoroughly described and some experimental results were also presented. The time constraints occurring in the system were also discussed.

Wizyjne systemy automatycznej kontroli jakości produkcji

W praktyce przemysłowej często zachodzi konieczność usunięcia z linii produkcyjnej wyrobów pod pewnym względem wadliwych, uszkodzonych, niewłaściwie zmontowanych bądź innych, posiadających pewne niepożądane cechy [1]. We wszystkich przypadkach, w których możliwa jest wzrokowa ocena jakości badanych produktów przez zatrudnionego na stanowisku kontroli produkcji człowieka, możliwe jest również jego zastąpienie przez automat wyposażony w system wizyjny, który po wykryciu wady wyrobu powodował będzie jego usunięcie z linii produkcyjnej, aby produkt ten nie podlegał już dalszym czynnościom związanym z jego montażem, wykończeniem, paczkowaniem itp. Rozwiązanie takie powoduje eliminację zbędnych czynności (procesów produkcyjnych wykonywanych na wadliwych wyrobach, które i tak w etapie końcowym muszą zostać ostatecznie odrzucone). Fakt powyższy posiada duże znaczenie z punktu widzenia rachunku ekonomicznego kosztów produkcji danego wyrobu [2]. Poza tym zastosowanie systemu inspekcyjnego z układem wizyjnym może przyczynić się także do zmniejszenia liczby dostarczonych na rynek wyrobów wadliwych (zwiększenie zaufania klientów do danego produktu, tworzenie odpowiedniego wizerunku firmy). Główną zaletą rozwiązania polegającego na zastąpieniu człowieka zatrudnionego na stanowisku kontroli jakości produkcji przez komputer wyposażony w system wizyjny jest to, że komputer, w przeciwieństwie do człowieka, pracuje zawsze w sposób obiektywny, nie ulega zmęczeniu w trakcie długotrwałego wykonywania cyklicznie powtarzających się, monotonicznych czynności. Także decyzje dotyczące odrzucenia wadliwego wyrobu mogą być

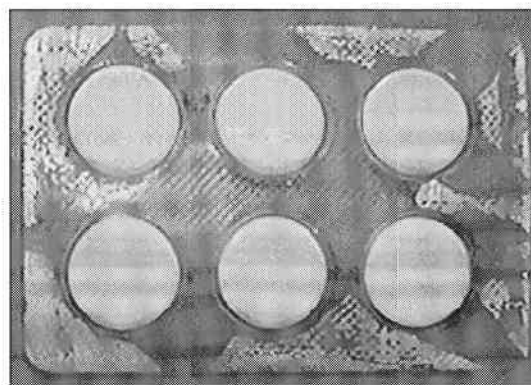
podejmowane przez system komputerowy zdecydowanie szybciej, w porównaniu z pracującym na tym stanowisku człowiekiem [3]. Duże tempo produkcji i związana z tym konieczność pracy systemu komputerowego w czasie rzeczywisty, powodują, że istotnym czynnikiem staje się duże zapotrzebowanie na moc obliczeniową, co uzasadnia zastosowanie w rozważanych systemach wizyjnych układów wieloprocesorowych.

W literaturze przedmiotu opisanych zostało wiele systemów automatycznej kontroli jakości produkcji, wykorzystujących układy wizyjne. Dla przykładu można wymienić opisany w pracy [4] system, nadzorujący proces pakowania elementów elektronicznych. Z kolei praca [5] przedstawia przykład systemu, w którym automatyczną kontrolę jakości produkcji połączono z operacją montażu, nadzorowaną przez system wizyjny robota przemysłowego. Znane są także przykłady zastosowań wizyjnych systemów inspekcyjnych w przemyśle tekstylnym [6], maszynowym [7, 8], a nawet w rolnictwie do sortowania i selekcji sadzonek roślin [9].

W rozdziale niniejszym rozważono możliwości zastosowania wieloprocesorowego układu TMS320C80 firmy „Texas Instruments” do pracy na stanowisku automatycznej kontroli jakości produkcji tabletek w zakładzie farmaceutycznym. Celem rozważanego systemu wizyjnego jest wykrycie tabletek posiadających widoczne uszkodzenia mechaniczne i ich usunięcie z taśmy produkcyjnej przed wykonaniem czynności związanych z ich umieszczeniem w plastikowym opakowaniu.

Analiza obrazów tabletek

W procesie produkcji tabletki umieszczane są w plastikowym opakowaniu posiadającym specjalne zagłębienia (służące do umieszczenia w nich tabletek). Następnie na wierzchnią stronę opakowania naklejana jest folia aluminiowa. Zadaniem rozważanego w pracy systemu wizyjnego jest wykrycie tabletek uszkodzonych w momencie, w którym tabletki zostały już umieszczone w opakowaniu, a na opakowanie nie została naklejona jeszcze folia aluminiowa. W przypadku wykrycia chociaż jednej tabletki uszkodzonej całe opakowanie musi zostać usunięte z taśmy produkcyjnej, zanim zostanie pokryte folią aluminiową (rys. 1). Przyjęcie takiego rozwiązania zapobiega wykonaniu zbędnych operacji (na uszkodzonych tabletkach) oraz gwarantuje, że wadliwe produkty nie zostaną dostarczone na rynek.

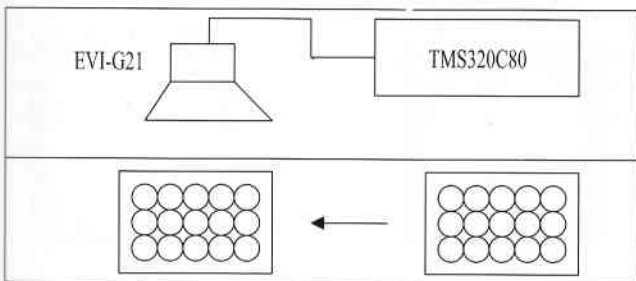


Rys. 1. Opakowanie z tabletkami analizowanymi w systemie wizyjnym

Analiza obrazów tabletek, mająca na celu wykrycie ich uszkodzeń mechanicznych jest procesem wieloetapowym, składającym

się z cyklu wykonywanych kolejno po sobie operacji. Na wstępie pozyskane z kamery obrazy tabletek muszą zostać poddane procesowi binaryzacji, mającemu na celu ich oddzielenie od tła obrazu. Następnie należy dokonać pomiarów wartości cech, które decydują o stopniu ewentualnego uszkodzenia tabletki. W ostatnim etapie pracy automatycznego systemu kontroli jakości produkcji, na podstawie wykonanych uprzednio pomiarów wartości cech, musi zostać podjęta decyzja o ewentualnym usunięciu z linii produkcyjnej opakowania zawierającego uszkodzoną tabletkę.

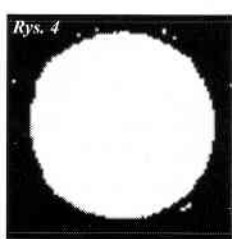
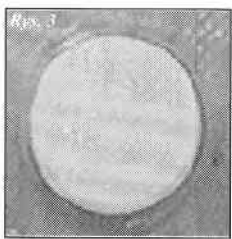
W dalszych etapach analizy założono, że opakowania z badanymi tabletkami zostały umieszczone na linii produkcyjnej w miejscach posiadających ściśle określone współrzędne przestrzenne. Zatem po umieszczeniu kamery na nieruchomym statywie i ustawieniu jej ogniskowej na stałą wartość poszczególne tabletki zawsze będą się pojawiać w z góry zdefiniowanych obszarach pozyskanego z kamery obrazu. Przyjęcie takiego założenia bardzo upraszcza problem segmentacji obrazu, w celu wydzielenia fragmentów reprezentujących pojedyncze tabletki. Sposób pracy rozważanego systemu wizyjnego został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Stanowisko automatycznej kontroli jakości produkcji z systemem wizyjnym.

Prezentowany system automatycznej kontroli jakości produkcji składa się z dostarczającej obrazu w standardzie PAL kamery CCD typu EVI-G21 oraz karty akwizycyjnej *Software Development Board* z układem wieloprocesorowym TMS320C80.

Pozyskane z kamery obrazy tabletek poddawane są na wstępie binaryzacji, której wartość progowa została ustalona eksperymentalnie na 175 poziomie jasności obrazu (obraz posiadał 256 poziomów jasności, a stanowisko było oświetlone źródłem światła o stałym natężeniu). Rozwiązanie takie pozwoliło na wydzielenie fragmentów obrazów przedstawiających tabletki, które po procesie binaryzacji uzyskały kolor biały (255 poziom jasności obrazu), z ich tła (plastikowe opakowanie), które po binaryzacji uzyskało kolor czarny (zerowy poziom jasności obrazu). Obrazy tabletki przed i po binaryzacji zostały zamieszczone odpowiednio na rysunkach 3 i 4.



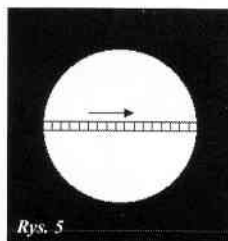
Rys. 3. Obraz tabletki przed binaryzacją Rys. 4. Obraz tabletki po binaryzacji

Uszkodzenia mechaniczne badanych tabletek polegać mogą albo na braku pewnego fragmentu tabletki, który został odłamany, albo też tabletkę może ulec pęknięciu. W celu wykrycia wystąpienia pierwszej z rozważanych możliwości uszkodzenia tabletki, dla każdej z analizowanych tabletek należy dokonać pomiaru liczby reprezentujących ją (po binaryzacji) białych pikseli. Następnie zmierzona w ten sposób liczba białych pikseli musi zostać porównana z wartością progową, reprezentującą minimalną liczbę białych pikseli, charakterystyczną dla nieuszkodzonej

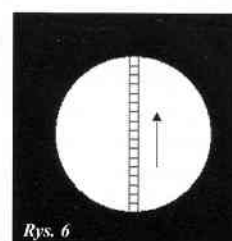
tabletki. Jeżeli uzyskana liczba białych pikseli będzie mniejsza, niż przyjęta wartość progowa, wówczas fakt ten będzie świadczył o braku pewnego fragmentu tabletki (jej pole powierzchni będzie pomniejszone, w stosunku do tabletki prawidłowej). Wartość progowa, określająca liczbę białych pikseli dla nieuszkodzonych tabletek, została ustalona eksperymentalnie (z pewnym marginesem bezpieczeństwa) na 3450 pikseli.

W celu wykrycia uszkodzeń tabletek (polegających na ich pęknięciu), należy analizować zbinaryzowane obrazy, w celu detekcji czarnych pikseli na białym obszarze reprezentującym tabletkę. Zaproponowano rozwiązanie polegające na poszukiwaniu czarnych pikseli wzdłuż linii przebiegających w czterech różnych kierunkach.

Analizowane są obrazy w formie kwadratu o boku równym 80 pikseli, przedstawiające pojedynczą tabletkę na tle fragmentu jej plastikowego opakowania. Następnie wybierana jest pozioma linia dzieląca analizowany obraz na dwie równe połowy. Wzdłuż tej linii analizowane są kolejno piksele rozważanego fragmentu obrazu, w kierunku od lewej do prawej krawędzi. Wykrycie pierwszego białego piksela powoduje inkrementację specjalnego licznika białych pikseli (licznik przed rozpoczęciem analizy musi zostać wyzerowany). Jeżeli następny (sąsiedni) piksel obrazu posiada kolor biały, wartość licznika zostaje również zwiększona o jeden. System pracuje w przedstawiony sposób aż do momentu napotkania pierwszego czarnego piksela, który świadczy o tym, że albo został osiągnięty przeciwny brzeg tabletki (pierwszy czarny piksel opakowania), albo też natrafiono na obszar pęknięcia tabletki. Po detekcji pierwszego czarnego piksela (występującego po ciągu białych pikseli) proces analizy obrazu ulega zakończeniu, a aktualna wartość licznika jest porównywana z wartością progową, odpowiadającą typowej średnicy nieuszkodzonej tabletki. Powyższa wartość progowa, została wyznaczona eksperymentalnie poprzez pomiar średnicy prawidłowych tabletek (z pewnym marginesem bezpieczeństwa), na 68 pikseli. Sposób analizy pikseli zbinaryzowanego obrazu tabletki został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5



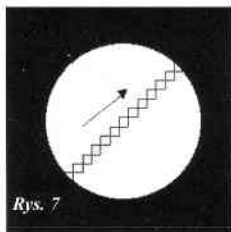
Rys. 6

Rys. 5. Analiza pikseli obrazu tabletki wzdłuż linii poziomej

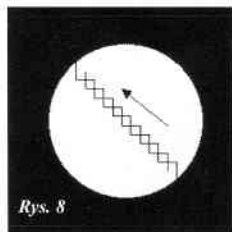
Rys. 6. Analiza pikseli obrazu tabletki wzdłuż linii pionowej

Analogicznie wybierana jest pionowa linia dzieląca obraz tabletki na dwie równe połowy. Sposób analizy leżących wzdłuż tej linii pikseli jest identyczny jak w przypadku linii poziomej. W tym wypadku piksele są analizowane kolejno w kierunku od dolnej do górnej krawędzi obrazu. Uzyskana w wyniku przeprowadzenia pomiaru wartość (inkrementowanego po wykryciu białego piksela licznika) powinna być równa (oczywiście w granicach dopuszczalnej tolerancji) średnicy nieuszkodzonej tabletki (wrażonej w pikselach). Jeżeli powyższy warunek nie jest spełniony, to fakt ten świadczy o pojawieniu się na białym obrazie tabletki czarnych pikseli, które odpowiadać mogą szczelinie powstałej w skutek pęknięcia. Sposób analizy obrazu wzdłuż linii pionowej przedstawiono na rys. 6.

W końcowym etapie analizowane są, w sposób analogiczny piksele położone wzdłuż dwóch przekątnych fragmentu obrazu zawierającego pojedynczą tabletkę. Sposób analizy przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Analiza pikseli obrazu wzdłuż pierwszej przekątnej



Rys. 8

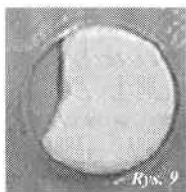
Rys. 8. Analiza pikseli obrazu wzdłuż drugiej przekątnej

W tym przypadku również uzyskanie wyniku pomiaru średnicy tabletki mniejszego od przyjętej uprzednio wartości progowej świadczy o wystąpieniu na białym obrazie tabletki czarnych pikseli odpowiadających szczelinie powstałej w skutek pęknięcia.

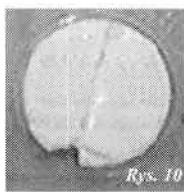
Omówione powyżej operacje, polegające na pomiarze (wyrażonym w pikselach) pola powierzchni tabletki oraz jej średnicy (w czterech różnych kierunkach), muszą zostać powtórzone (z osobna) dla wszystkich tabletek wchodzących w skład testowanego opakowania. Wykrycie przynajmniej jednej uszkodzonej tabletki, dla której zaproponowane testy nie przebiegły pomyślnie, stanowi podstawę do usunięcia z linii produkcyjnej całego opakowania przed naklejeniem na niego folii aluminiowej. Rozwiązanie takie gwarantuje, że wadliwy produkt nie trafi do konsumenta.

Wyniki eksperymentów

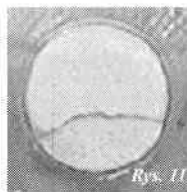
W celu stwierdzenia poprawności zaproponowanej metody analizy obrazów tabletek przeprowadzono liczne eksperymenty zarówno z tabletkami normalnymi, jak i uszkodzonymi. Podczas eksperymentów analizie poddano łącznie 50 tabletek, w tym 10 prawidłowych i 40 uszkodzonych (o różnym stopniu i sposobie uszkodzenia). Wszystkie z analizowanych prawidłowych tabletek przeszły pomyślnie każdy z rodzajów testów. Natomiast wszystkie z uszkodzonych tabletek zostały przez wizyjny system kontroli jakości produkcji odrzucone. Uzyskane wyniki eksperymentów przemawiają na korzyść (oraz świadczą o dużej skuteczności) zaproponowanej metody wykrywania uszkodzeń tabletek. Poniżej na rysunkach 9–11 zamieszczono przykładowe (pozyskane z kamery) obrazy uszkodzonych tabletek. W pierwszym przypadku (rys. 9) brakuje fragmentu tabletki, natomiast w pozostałych (rys. 10 i 11) tabletki jest pęknięta.



Rys. 9. Obraz tabletki uszkodzonej (brakujący fragment)



Rys. 10. Obraz tabletki uszkodzonej (pęknięcie)

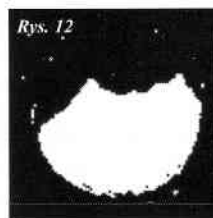


Rys. 11. Obraz tabletki uszkodzonej (pęknięcie)

W celu ilustracji sposobu pracy rozważanego systemu wizyjnego opisano także kilka przypadków wykrycia wadliwej tabletki, dla różnych sposobów jej uszkodzenia.

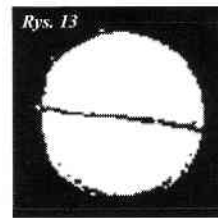
Na rys. 12 pokazano tabletkę (obraz po binaryzacji), której fragment uległ odłamaniu. Tabletki ta została odrzucona już po przeprowadzeniu pierwszego testu związanego z pomiarem jej pola powierzchni.

Z kolei na rys. 13 zamieszczono obraz tabletki (po binaryzacji), która była pęknięta w kierunku poziomym. W tym wypadku o odrzuceniu tabletki zdecydował negatywny wynik testu polegającego na analizie kolejnych pikseli linii pionowej, dzielącej obraz na dwie równe części.



Rys. 12

Rys. 12. Tabletki odrzucona przez system kontroli jakości produkcji (pomiar pola powierzchni)



Rys. 13

Rys. 13. Tabletki odrzucona przez system kontroli jakości produkcji (detekcja pęknięcia na linii pionowej)

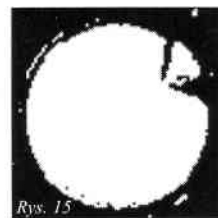
Natomiast na rys. 14 zamieszczono obraz tabletki pękniętej w kierunku pionowym, odrzuconej w wyniku analizy pikseli leżących na poziomej linii, dzielącej obraz na dwie połowy.

Z kolei na rys. 15 zamieszczono zbinaryzowany obraz tabletki z pęknięciem zlokalizowanym w prawym górnym rogu obrazu. W tym przypadku o odrzuceniu tabletki przez system kontroli jakości zdecydował negatywny wynik testu podczas analizy kolejnych pikseli, położonych na przekątnej obrazu.



Rys. 14

Rys. 14. Tabletki odrzucona przez system kontroli jakości produkcji (detekcja pęknięcia na linii poziomej)



Rys. 15

Rys. 15. Tabletki odrzucona przez system kontroli jakości produkcji (detekcja pęknięcia na przekątnej)

Pojedynczy procesor DSP wieloprocesorowego układu TMS320C80 potrzebował na wykonanie pomiaru (wyrażonego w pikselach) pola powierzchni tabletki $2,54 \times 10^{-3}$ s. Podobnie analiza pikseli wzdłuż pionowej lub poziomej linii obrazu wymagała czasu równego $3,17 \times 10^{-5}$ s. Wykonanie analogicznej operacji dla przekątnej obrazu wymagało natomiast $4,46 \times 10^{-5}$ s. Zatem całkowity czas obliczeń związanych z analizą obrazu pojedynczej tabletki wynosił $2,69 \times 10^{-3}$ s.

Wykorzystanie możliwości obliczeniowych wieloprocesorowego układu TMS320C80 polegało na implementacji architektury typu SIMD, gdzie każdy z czterech użytych procesorów DS, wykonywał operacje związane z analizą obrazu innej tabletki. W rozważanym systemie równoległym wartość współczynnika przyspieszenia obliczeń (ang. *speedup*) wyniosła 3,16. Jest to wartość znacznie mniejsza od maksymalnej dopuszczalnej teoretycznie wartości tego współczynnika dla architektury typu SIMD, która w przypadku czterech procesorów wynosi 4,00. Fakt powyższy spowodowany został występowaniem, podczas pracy wieloprocesorowego układu TMS320C80, znacznych narzutów komunikacyjnych, związanych z oczekiwaniem poszczególnych jednostek obliczeniowych na przydział prawa dostępu do portu komunikacyjnego, umożliwiającego wymianę danych (pikseli pozyskanych z kamery obrazów) oraz kodów instrukcji (podczas odświeżania podręcznych pamięci programu) z zewnętrzną pamięcią systemu.

Ostatecznie czas potrzebny na analizę obrazu jednej tabletki został zredukowany do $8,51 \times 10^{-4}$, co oznacza, że system jest w stanie w ciągu jednej sekundy przeprowadzić analizę około 1175 tabletek. Uzyskanie takiego wyniku pozwoliła na realizację wymienionych operacji w czasie rzeczywistym, w warunkach pracy na linii produkcji tabletek w zakładzie farmaceutycznym.

Możliwość przeprowadzenia analizy obrazów tak dużej liczby tabletek w ciągu jednej sekundy powoduje, że ograniczenia nałożone na pracę systemu wynikają raczej z szybkości procesu akwizycji danych niż z mocy obliczeniowej zastosowanych jednostek przetwarzających. W przypadku karty *Software Development Board* pozyskiwane są obrazy o rozdzielczości 768 na 576 pikseli, które mogą zawierać maksymalnie obrazy 63 tabletek (pojedyncza tabletką zajmuje obszar obrazu o wymiarach 80 na 80 pikseli). Kamera dostarcza w ciągu sekundy 25 obrazów, czyli w ciągu jednej sekundy mogą podlegać analizie obrazy najwyżej 1575 tabletek. Dalsze zwiększenie wydajności systemu automatycznej kontroli jakości produkcji można osiągnąć poprzez zwiększenie mocy obliczeniowej (zastosowanie np. nowszej wersji układu TMS320C80, taktowanej sygnałem o częstotliwości 60 MHz zamiast 40 MHz – w przypadku starszej wersji tego układu) oraz zwiększenie szybkości akwizycji danych. W tym drugim przypadku jednak pojawia się konieczność zastosowania bardzo szybkich, specjalizowanych układów *frame grabberów*, dostarczających obrazy o zwiększonej rozdzielczości oraz zapewniających dużą szybkość odświeżania obrazów. Jednak układy takie wymagają współpracy również ze specjalizowanymi kamerami, dostarczającymi kolejnych kadrów obrazu ze zwiększoną częstotliwością w stosunku do zastosowanej podzecz eksperymentów kamery pracującej w standardzie PAL.

Literatura

1. L. MACAIRE, J. G. POSTAIRE: Automated visual inspection of galvanised and painted metallic strips. 1993 CompEuro Proceedings, Computers in Design, Manufacturing, and Production. May 24–27, 1993, Paris-Evry, France, s. 8–15.
2. T. THOMAS, M. CATTOEN: System for defects detection on material. 1993 CompEuro Proceedings, Computers in Design, Manufacturing, and Production. May 24–27, 1993, Paris-Evry, France, s. 16–22.
3. B. MEHENNI, M. A. WAHAB: APRIS: Automatic pattern recognition and inspection system. 1993 CompEuro Proceedings, Computers in Design, Manufacturing, and Production. May 24–27, 1993, Paris-Evry, France, s. 23–28.
4. BERGER, P. DUNBAR, C. ROBERTS: Machine vision character recognition in the electronic packaging industry, three case studies. VISION'85 – Conference Proceedings. Machine Vision Association of SME. North Holland, Detroit, Michigan 1985.
5. F. J. M. Van der HEIJDEN: Assembly of small components by a vision controlled robot using Philips vision system PAPS. Proceedings of the 5th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls. North Holland, Amsterdam 1985.
6. M. LEFLEY, A. A. HASHIM, J. D. SPENCER: Vision for textile automation. Proceedings of the 5th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls. North Holland, Amsterdam 1985.
7. D. C. BURGESS: Industrial image processing at speed. Proceedings of the 5th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls. North Holland, Amsterdam 1985.
8. E. SCHMIDBERGER, R. AHLER: Quality control with a robotguided electro-optical sensor. Robot Vision and Sensory Controls. Proceedings of the 4th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls. London 1984, s. 27–36.
9. H. DELEPANQUE, P. BONNET, J. G. POSTAIRE: An intelligent robotic system for in vitro plantlet production. Proceedings of the 5th International Conference on Robot Vision and Sensory Controls. North Holland, Amsterdam 1985.

Pracę wykonano w ramach grantu KBN 8T11C 03914 „Analiza i projektowanie systemów czasu rzeczywistego o różnym stopniu rozproszenia”.