ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989
Seria : AUTOMATYKA z.98 Nr kol.1042

Henryk PALUS
Instytut Automatyki
Politechniki Śląskiej

WIZYJNY SYSTEM POMIAROWY DO POMIARU BARWY

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję i model wizyjnego systemu pomiarowego służącego do odczytu wielobarwnego rysunku mozaikowego (WRM). Sformułowano model matematyczny systemu pomiarowego oraz porównano wyniki otrzymane z modelu matematycznego z wynikami pomiarowymi. Zaprezentowano metodę oraz wyniki badania powtarzalności pomiaru poziomu szarości.

1. WSTĘP

Przedstawiona w [1] definicja systemu pomiarowego, jedna z wielu znanych w literaturze, wyszczególnia w nim następujące bloki:

- sensoryczny,
- dopasowania sygnałów,
- przetwarzania sygnałów,
- prezentacji wyników.

Jeżeli blok sensoryczny stanowi czujnik obrazowy (lampa analizująca, półprzewodnikowa matryca fotoelementów), to taki system pomiarowy można nazywać wizyjnym. Pozostałe bloki systemu wizyjnego mają różne rozwiązania konstrukcyjne, chociaż zwraca uwagę częste stosowanie mikrokomputera jako bloku przetwarzania sygnałów i wykorzystanie jego monitora do prezentacji wyników. Wizyjne systemy pomiarowe znajdują coraz szersze zastosowanie m.in. do pomiarów wielkości geometrycznych (odległości, powierzchni, płaskości), wielkości mechanicznych (prędkości, naprężeń), wielkości optycznych (współczynnika załamania światła w światłowodzie) oraz fotometrycznych (rozkładu luminancji).

W pracach [2,3] przedstawiono koncepcję wykorzystania wizyjnego systemu pomiarowego do odczytu wielobarwnego rysunku mozaikowego (WRM) stosowanego we włókiennictwie.

2. KONCEPCJA SYSTEMU

WRM, będący projektem wzoru tkaniny lub dzianiny, jest podczas procesu przygotowania produkcji kodowany na nośniku sterującym pracą maszyny włókienniczej (nośnik magnetyczny, pamięć EPROM, wzornica żakardowa). Aby możliwe było przeprowadzenie takiego kodowania musi nastąpić odczyt WRM polegający na identyfikacji barwy każdego elementu rysunku. Przez identyfikację barwy rozumie się tutaj proces pomiaru barwy zakończony klasyfikacją wyniku pomiarowego do jednej z klas wyznaczonych przez

zdefiniowane wcześniej barwy wzorcowe. Problem odczytu WRM można zdekomponować na dwa następujące podproblemy:

- wybierania elementów rysunku,
- identyfikacji barwy wybranego elementu rysunku.

Można przypuszczać, iż system wizyjny stwarza możliwości rozwiązania obu tych podproblemów. Mianowicie czujnik obrazowy zapewnia automatyczne wybieranie poszczególnych elementów WRM oraz może zapewnić pozyskiwanie informacji wystarczającej do identyfikacji barwy. Przegląd metod pomiaru barwy pokazuje, że powszechnie korzysta się ze skal trójwymiarowych (np. RGB, XYZ, jasność, odcień, nasycenie) [4]. Z drugiej strony można zauważyć, że istnieją czujniki obrazowe, będące m.in. podstawą działania urządzeń telewizyjnych, w których niski poziom zniekształceń kolorymetrycznych pozwala nie tylko na bardzo dobrą reprodukcję barwy, ale i na stosowanie ich w systemach do pomiaru barwy [5]. Tak więc omawiany system wizyjny mógłby opierać się na wykorzystaniu kamery telewizji kolorowej z wyjściem RGB.

Ponieważ WRM stosowane we włókiennictwie wykonywane są z użyciem kilku barw różniących się odcieniami, to metodą o wystarczającej zdolności rozróżniania barw może być metoda wykorzystująca skalę jednowymiarową tzn. skalę poziomów szarości. W takim przypadku można ograniczyć się do zastosowania w systemie wizyjnym kamery telewizji czarno - białej. Jeżeli na rysunku występują barwy o zbliżonych poziomach szarości to można zwiększyć rozróżnialność barw w systemie wizyjnym przez użycie filtrów wspomagających.

Tak więc przedstawiana koncepcja odczytu WRM opiera się na jednoczesnym wprowadzeniu do pamięci bloku przetwarzania sygnałów informacji o barwie wszystkich elementów odczytywanego fragmentu WRM a w ramach dalszego cyfrowego przetwarzania następuje identyfikacja barwy każdego elementu obrazu i segmentacja obrazu, tzn.podział tego obrazu na części odpowiadające elementom WRM.

3. MODEL SYSTEMU

Przedstawiany model systemu wizyjnego do odczytu WRM jest wynikiem poszukiwania kompromisu pomiędzy możliwościami funkcjonalnymi poszczególnych urządzeń a ich dostępnością i ceną. Model składa się z:

- oświetlacza,
- kamery telewizji czarno - białej z obiektywem,
- interfejsu kamery telewizyjnej,
- mikrokomputera z monitorem.

W modelu zastosowano układ oświetleniowy oparty na urządzeniu do reprodukcji typu UR - 9711. Urządzenie to, zasilane z sieci prądu przemiennego, zawiera 4 stożkowe oprawy oświetleniowe do pracy z żarówkami 60 W, które oświetlają pulpit z zamocowanym WRM. Wykorzystano uniwersalną kamerę telewizji użytkowej typu TP-K 16 ze standardowym obiektywem typu

Tevidon 1,4/25. Do pamięcania i cyfrowego przetwarzania informacji pomiarowej w systemie użyto mikrokomputera klasy IBM PC/XT. Otwarta konstrukcja tego mikrokomputera pozwoliła na umieszczenie karty interfejsu kamery telewizyjnej w jego gnieździe rozszerzającym. Wybrany interfejs firmy Refleks [6] jest jedną z pierwszych produkowanych w kraju konstrukcji tego typu. Umożliwia on m.in. dyskretyzację obrazu na 200*320 elementów, przy czym wartość sygnału dla każdego z elementów obrazu jest kwantowana na 256 poziomów szarości.

4. MODEL MATEMATYCZNY SYSTEMU

4.1. Formułowanie modelu

Traktowanie omawianego systemu wizyjnego jako systemu pomiarowego wymaga sformułowania dla niego modelu matematycznego [7]. Modelowanie to opieramy na rozpatrzeniu pojedynczego elementu WRM o barwie opisanej za pomocą widmowego współczynnika odbicia $\rho(\lambda)$. Wielkością wyjściową będzie poziom szarości L z przedziału [0,255] uzyskany dla rozpatrywanego elementu WRM.

Przyjrzyjmy się zjawiskom zachodzącym w systemie pomiarowym. Na powierzchnię elementu WRM o barwie wyrażonej przez $\rho(\lambda)$ pada z oświetlacza strumień świetlny o rozkładzie widmowym $\phi_0(\lambda)$. Następuje odbicie i powstaje strumień odbity o rozkładzie widmowym $\phi_1(\lambda)$ równym:

$$\phi_1(\lambda) = \rho(\lambda)\ \phi_0(\lambda) \qquad \text{(I)}$$

Strumień odbity pada na powierzchnię obiektywu kamery. Przyjmujemy następujące założenia:

- element WRM znajduje się w osi optycznej obiektywu,
- odległość elementu WRM od powierzchni obiektywu jest dużo większa niż wymiary elementu, wymiary otworu obiektywu i wymiary powierzchni światłoczułej widikonu,
- powierzchnia elementu WRM odbija światło w sposób całkowicie rozproszony (tzw. powierzchnia lambertowska).

Przy takich założeniach można wyprowadzić zależność pomiędzy strumieniem wychodzącym z obiektywu Φ_{21} a strumieniem Φ_1 padającym na jego powierzchnię [8] i zapisać ją dla rozkładów widmowych tych strumieni:

$$\phi_2(\lambda) = \frac{\tau(\lambda)\ \rho(\lambda)\ \beta^2}{4\ F^2\ (1+\beta)^2}\ \phi_1(\lambda), \qquad \text{(II)}$$

gdzie:

- $\tau(\lambda)$ – widmowy współczynnik przepuszczania obiektywu,
- F – liczba otworu względnego obiektywu,
- β – współczynnik skali odwzorowania zdefiniowany jako b'/b_1 gdzie:

- b' - odległość obiektywu od płytki sygnałowej widikonu,
- b - odległość WRM od powierzchni wejściowej obiektywu.

Informacja o barwie elementu WRM zawarta w strumieniu świetlnym Φ_2 zostaje w widikonie przekształcona w sygnał prądowy:

$$i = i_o + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_2(\lambda)\, S_i(\lambda)\, d\lambda, \qquad \text{(III)}$$

gdzie:
- i_o - prąd ciemny widikonu,
- $S_i(\lambda)$ - czułość prądowa widikonu.

Zakładając liniowy charakter przetwarzania prądowo-napięciowego w układach elektronicznych kamery otrzymamy dla wyjściowego sygnału napięciowego kamery:

$$u = K\, i, \qquad \text{(IV)}$$

gdzie K - współczynnik proporcjonalności. Napięcie wyjściowe u, reprezentujące jasność (szarość) rozważanego elementu WRM, podlega w interfejsie kamery równomiernemu kwantowaniu na 256 poziomów. Tak więc poziom szarości elementu WRM wynosi:

$$L = \frac{255}{U_{max}}\, u, \qquad \text{(V)}$$

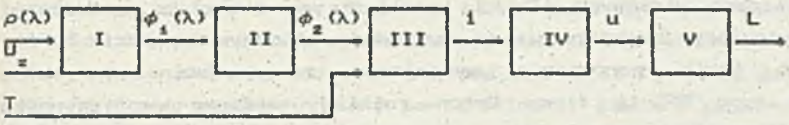
przy czym U_{max} to rzeczywisty zakres przetwarzania, tj. wartość napięcia przetwarzanego odpowiadająca maksymalnej wartości słowa wyjściowego.

Złożenie równań (I) - (V), opisujących kolejne stopnie przetwarzania, daje następujące równanie przetwarzania całego systemu pomiarowego:

$$L = \frac{255}{U_{max}}\, U_o + \frac{255\, K\, \beta^2}{4\, U_{max}\, F^2\, (1+\beta)^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_o(\lambda)\, \rho(\lambda)\, \tau(\lambda)\, S_i(\lambda)\, d\lambda,$$

gdzie przez $U_o = K\, i_o$ oznaczono poziom czerni napięcia wyjściowego z kamery. Równaniu temu odpowiada schemat strukturalny przedstawiony na rys.1. Na rysunku tym uwzględniono ponadto 2 wielkości wpływające, które choć nie występują w sposób jawny w równaniu przetwarzania, to jednak

wpływają na parametry model . Są to napięcie zasilania oświetlacza U_z, które wpływa na rozkład widmowy $\phi_o(\lambda)$ oraz temperatura otoczenia T_1 od której zależy prąd ciemny widikonu i_o.



Rys.1. Schemat strukturalny systemu pomiarowego do odczytu WRM
Fig.1. Block diagram of measurement system for MMD reading

Należy stwierdzić, że rozpatrywana metoda pomiaru barwy prowadzi do stosunkowo złożonego równania przetwarzania, w którym występuje wiele parametrów konstrukcyjnych systemu zarówno regulowanych bezpośrednio (β, F, U_{max}), pośrednio ($S_i(\lambda)$ oraz U_o zależne od napięcia polaryzacji płytki sygnałowej widikonu U_p) jak i nieregulowanych ($\phi_o(\lambda)$, $\tau(\lambda)$).

W celu dalszego wykorzystania modelu wyznaczono wartości jego stałych parametrów. Za pomocą oscyloskopu zmierzono poziom czerni w sygnale wizyjnym. W zależności od U_p poziom ten waha się od U_o=20 mV do U_o=70 mV. Założono, że obiektyw ma charakterystykę widmową współczynnika przenoszenia zbliżoną do znanej z literatury charakterystyki obiektywu firmy Canon. Odnośnie pozostałych do wyznaczenia rozkładów $\phi_o(\lambda)$ i $S_i(\lambda)$ można zauważyć, że :

$$\phi_o(\lambda) = \phi_o^{max}\ \phi_o^{w}(\lambda),$$

$$S_i(\lambda) = S_i^{max}\ S_i^{w}(\lambda),$$

gdzie indeks "w" oznacza rozkład względny. Podstawienie tych wzorów do równania przetwarzania pozwala wykorzystać znane z literatury rozkłady względne: czułości prądowej widikonu PWM-21 stosowanego w kamerze TPK-16 oraz strumienia świetlnego iluminantu A, który dobrze przybliża rozkład żarówki wolframowej o mocy 60W. Ostatnim określanym parametrem modelu jest czynnik K $\phi_o^{max} S_i^{max}$. Ponieważ jego wyznaczenie wymagałoby specjalistycznych pomiarów to dla najjaśniejszej barwy przyjmiemy , że poziom szarości uzyskany z modelu matematycznego jest równy poziomowi szarości z pomiaru. Umożliwi to obliczenie wartości poszukiwanego czynnika. Znajomość rozkładu widmowego czułości widikonu pozwala przyjąć, że λ_1= 380 nm, a λ_2= 780 nm.

4.2. Weryfikacja doświadczalna modelu

Dla sformułowanego modelu matematycznego można przeprowadzić ocenę dokładności, która w obecnym stanie pracy nad systemem wizyjnym dotyczyć będzie zgodności równania przetwarzania z wynikiem doświadczalnym. W tym celu korzystając z modelu wyznaczymy poziomy szarości dla grupy barw o znanych rozkładach widmowych $\rho(\lambda)$ i wyniki te porównamy z wartościami uzyskanymi w pomiarze bezpośrednim na stanowisku opisanym w punkcie 3. Aby przeprowadzić takie porównanie wyznaczono za pomocą kolorymetru spektralnego typu RFC-16 firmy Opton rozkłady widmowe współczynnika odbicia dla próbek 10 różnych barw.

Wyznaczanie poziomów szarości na podstawie modelu matematycznego ułatwia program komputerowy uruchomiony na mikrokomputerze klasy IBM PC/XT. Po wprowadzeniu z klawiatury wartości niektórych parametrów konstrukcyjnych modelu, program ten wczytuje z pamieci dyskowej zapisane w postaci 21-elementowych plików (co 20 nm) wartości rozkładów widmowych $\phi_o^w(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $S_i^v(\lambda)$ oraz $\rho(\lambda)$ dla 10 barw. Po podaniu zmierzonej wartości poziomu szarości dla najjaśniejszej barwy (żółtej) program, dokonując całkowania numerycznego za pomocą kwadratury złożonej trapezów, oblicza poziom szarości dla pozostałych 9 barw.

Pomiary na stanowisku przeprowadzono po nastawieniu takich wartości regulowanych parametrów konstrukcyjnych, przy których otrzymywane poziomy szarości zajmują możliwie dużą część skali 0-255. Wartości te wynosiły odpowiednio: β=0.043 (b'=17.3 mm, b=400 mm), U_{max}=0.96 V, F=4, U_p=28 V. Wykorzystano program komputerowy, który na podstawie pozyskanego przez system wizyjny obrazu, wyznaczał średni poziom szarości dla wszystkich elementów próbki barwnej.

W zamieszczonej poniżej tabeli zestawiono wartości poziomu szarości dla 10 barw uzyskane w wyniku modelowania matematycznego (L_{mod}) z wartościami z pomiarów (L_{pom}).

BARWA	CNIEB	CZAR	CZIEL	JZIEL	CZERW	JBRAZ	JNIEB	POM	CYTR	ŻÓŁT
L_{mod}	44	50	66	88	128	162	169	178	223	233
L_{pom}	41	43	70	86	117	142	181	164	229	233

Jak widać, błąd popełniany przy wyznaczaniu poziomu szarości na podstawie modelu nie przekracza w najgorszym przypadku kilkunastu procent od wartości uzyskanej z pomiaru. Większe znaczenie ma fakt, że model, za wyjątkiem jednego przypadku (barwa jasnoniebieska i pomarańczowa), prawidłowo porządkuje barwy według ich poziomu szarości.

5. BADANIE POWTARZALNOŚCI P IARU POZIOMU SZAROŚCI

Ponieważ w rozpatrywanym systemie wizyjnym odbywa się rozpoznawanie barwy na podstawie jednej cechy (poziomu szarości), to powtarzalność pomiaru poziomu szarości ma znaczenie dla charakteryzującej system pomiarowy zdolności rozróżniania barw. Może być ona także wskaźnikiem jakości dla konkretnego systemu wizyjnego. Istnieją dwa możliwe podejścia do wyznaczania powtarzalności poziomu szarości. Pierwsze podejście opiera się na przeprowadzeniu oceny powtarzalności pomiaru poziomu szarości dla kilku wybranych elementów obrazu, natomiast drugie podejście wyznacza taką ocenę dla wszystkich elementów obrazu. Drugie podejście zapewnia bardzo dobre uśrednienie oceny powtarzalności pomiaru poziomu szarości po całej powierzchni obrazu. Jednak ze względu na rozmiary obrazu (64 kB) i ograniczoną pojemność pamięci operacyjnej realizacja tego podejścia jest możliwa tylko dla kilku obrazów. Tak więc uśrednienie wyniku pomiaru odbywałoby się na podstawie próbki o małej liczności. Z tego względu zdecydowano się na podejście pierwsze.

Na opisanym powyżej stanowisku modelowym znajdującym się w zaciemnionym pomieszczeniu zamocowano 5-barwny rysunek mozaikowy. Ustabilizowano położenie lamp oświetlacza i odległość kamery od rysunku (β). Z pomocą firmowego oprogramowania interfejsu co 5 minut zapisywano w pamięci dyskowej komputera kolejne obrazy tego samego WRM. Uruchomiono program, który po wczytaniu takiego obrazu i zadaniu współrzędnych wybranych jego elementów, wyświetla wartości ich poziomu szarości. W ten sposób przeprowadzono serię 50 pomiarów poziomu szarości dla 5 elementów obrazu o różnych barwach. Otrzymane w ciągu prawie 5-godzinnej pracy systemu wyniki pomiarowe pokazują, że w systemie występuje dryft poziomu szarości wynoszący około 20 (w odniesieniu do stosowanych 256 poziomów szarości).

6. ZAKOŃCZENIE

Pełną przydatność modelu będzie można ocenić po dokonaniu obliczeń i badań doświadczalnych wpływu zmiany wielkości występujących w modelu. Dalsze prace nad omawianym systemem wizyjnym będą więc dotyczyły:

- wpływu regulowanych parametrów konstrukcyjnych na skalę poziomów szarości.
- optymalnego zestawu parametrów konstrukcyjnych ze względu na długość użytecznej części skali poziomów szarości.
- możliwości rozpoznawania barw z wykorzystaniem skali zbudowanej za pomocą składowych R, G, B (praca kamery z filtrami).
- ustalenia przyczyny dryftu poziomu szarości i ograniczenia jego wielkości.
- opracowania efektywnego algorytmu segmentacji obrazu z uwzględnieniem mozaikowego charakteru WRM.

Przedstawiony model matematyczny może zostać łatwo zmodyfikowany w

przypadku zastosowania bardziej złożonej metody rozpoznawania barwy korzystającej ze skali wielowymiarowej, np. R, G, B. Należy wtedy wprowadzić w wyrażenie podcałkowe charakterystykę przenoszenia odpowiedniego filtru $\tau_F(\lambda)$.

LITERATURA

[1] Bentley J.P., Principles of measurement systems, Longman, London 1985.

[2] Palus H., Telewizyjny czytnik wielobarwnego rysunku dywanowego, Materiały X Krajowej Konferencji Automatyki, Lublin 1988, tom 2, ss. 97-105.

[3] Palus H., Automatyzacja odczytu wielobarwnego rysunku mozaikowego, ZN Pol.Sl. Seria: Automatyka z.96, Gliwice 1988, ss. 187-195.

[4] Grum F., Bartleson C.J. /eds./, Optical Radiation Measurements, vol.2, Color Measurement, Academic Press, New York 1980.

[5] Ergandzev N.A., Cvetnoe televidenie v izmeritel'noj technike, Svjaz', Moskva 1980.

[6] Interfejs kamery TV, Instrukcja użytkowania, PWPO-T Refleks, Warszawa 1987.

[7] Piotrowski J., Teoria pomiarów, PWN, Warszawa 1986.

[8] Marguerre H.-H., Die lichttechnische Lösung von Sichtprüfaufgaben mit Bildaufnahmesensoren, Elektronik 14, 1988, ss. 87-97.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЦВЕТА

Р е з ю м е

В статье представлена концепция и физическая модель измерительной системы технического зрения разработанной для ввода в ЭВМ многоцветного растрового рисунка. Сформулирована математическая модель и сравнены полученные с ее помощью результаты с измерительными результатами. Описан метод и результаты исследования повторяемости уровня серого.

VISION MEASUREMENT SYSTEM FOR COLOUR MEASUREMENT

S u m m a r y

The paper presents the idea and model of vision measurement system for reading of multicolour mosaic-drawing (MMD). A mathematical model is formulated. There are also compared results which are computed using author's mathematical model with measurement results. Method and results of repeatability of measurement of grey level are described.