

TOMASZ JAWORSKI, JACEK KUCHARSKI

Politechnika Łódzka, Instytut Informatyki Stosowanej

ALGORYTM REKONSTRUKCJI MAPY ROZKŁADU TEMPERATURY NA POWIERZCHNI OBRACAJĄCEGO SIĘ WALCA ZE STRUMIENIA VIDEO KAMERY TERMOWIZYJNEJ

W artykule przedstawiono algorytm opracowany w celu rekonstrukcji pełnej mapy rozkładu temperatury na powierzchni obracającego się stalowego walca nagrzewanego indukcyjnie. Źródłem danych dla algorytmu jest strumień wideo pochodzący z kamery termowizyjnej. Uwzględniona została geometria obiektu i konieczność synchronizacji wykonywanych pomiarów względem aktualnego położenia kąтового walca. Ostatecznie, z serii zsynchronizowanych pomiarów rekonstruowany jest rozkład dla całej powierzchni walca.

WPROWADZENIE

W trakcie prac badawczych dotyczących regulacji temperatury powierzchni nagrzewanego indukcyjnie walca stalowego, prowadzonych w Instytucie Informatyki Stosowanej PŁ, wykorzystywano początkowo pirometry pozwalające na pomiar temperatury wzdłuż obwodu walca, w stałym punkcie na jego tworzącej [1]. Pomiar punktowy w naturalny sposób ograniczał ilość pozyskiwanej informacji o aktualnej temperaturze powierzchni walca. Aby poprawić ten stan rzeczy, w eksperymentalnym układzie badawczym zainstalowano kamerę termowizyjną, pozwalającą na uzyskiwanie bogatszej informacji o rozkładzie temperatury na powierzchni walca. Zastosowano kamerę FLIR A615 [2], która dzięki pracy z prędkością 200 FPS w trybie okienkowym o rozdzielności 640x120px, może stać się integralną i cenną częścią pracującego w czasie rzeczywistym układu regulacji temperatury walca, pod warunkiem odpowiedniego przetwarzania uzyskiwanych za jej pomocą danych obrazowych.

Jednym z pierwszych problemów, które należało rozwiązać okazała się potrzeba uzyskiwania na bieżąco informacji o temperaturze całej powierzchni walca, a nie tylko wycinka, aktualnie obserwowanego przez kamerę, co przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wycinek powierzchni walca w polu widzenia kamery (120px wysokości)

W tym celu opracowano algorytm realizujący zadanie odtworzenia/rekonstrukcji rozkładu temperatury na powierzchni, którego etapy przedstawiono w kolejnych punktach niniejszego artykułu.

1. PRZETWARZANIE WSTĘPNE

Ramki, będące danymi wyjściowymi z kamery, są wstępnie „przycinane” tak, aby widoczny był tylko interesujący z punktu widzenia regulacji temperatury fragment obrazu (tzw. *Region of Interest* – ROI), wykorzystywany w dalszych etapach przetwarzania. Wybierany jest on manualnie uwzględniając w obrazie obiekt oraz kilka pikseli marginesu z otoczenia obiektu. Pozwala to istotnie zmniejszyć rozmiar pamięci zajmowanej przez ramki.

Na tym etapie korygowane są również martwe piksele pomiarowe kamery, których wartość jest stała [3] lub zmienia się nieznacznie bez względu na stan obserwowanego obiektu. Korekcja odbywa się poprzez nałożenie filtra medianowego na wybrane piksele, z maską sąsiedztwa 3x3.



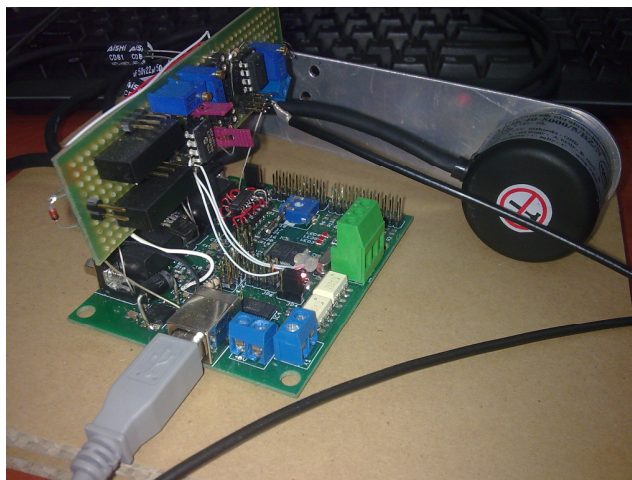
Rys. 2. Znaczniki cieplne: widoczne kontury walca oraz znacznik poziomy, zamontowany na konstrukcji

W ramach przetwarzania wstępnego określone są także wymiary i położenie walca w polu widzenia kamery (kalibracja algorytmu). W tym celu wykorzystywane są znaczniki (ang. *markers*) cieplne wykonane z drutu oporowego, zamontowane na walcu i jego konstrukcji nośnej, jak przedstawiono na rysunku 2. Szersze informacje na ten temat zawarto w [4].

Ostatecznie, po wykonaniu kalibracji, kamera przełączana jest w tryb okienkowy, pozwalający na osiągnięcie prędkości akwizycji 200 ramek/s przy rozdzielczości 640x120.

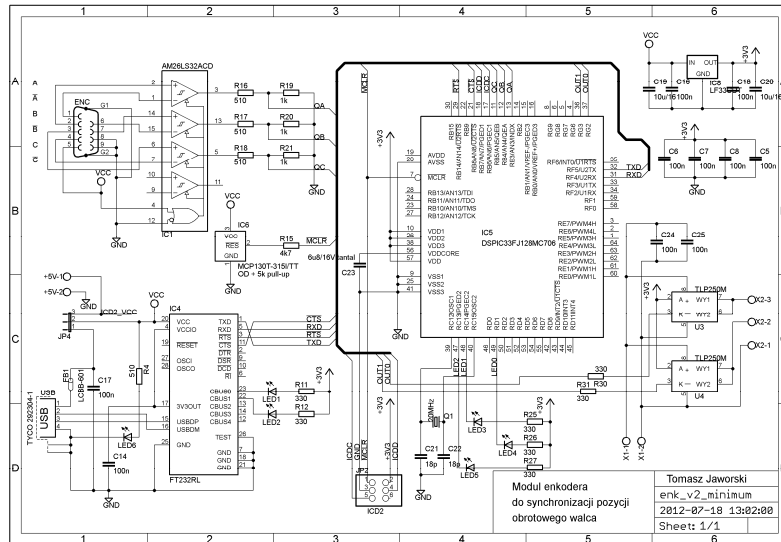
2. SYNCHRONIZACJA RAMEK

Złożenie poszczególnych ramek w mapę całej powierzchni walca, wymaga przyporządkowania poszczególnym ramkom pomiarowym odpowiednich punktów kątowych na obwodzie walca. Zadanie to jest wykonywane przez elektroniczny moduł synchronizacji, wykorzystujący enkoder inkrementalny MOK40-5000-5-BZ-N generujący 20000 imp./sek. Prototyp urządzenia, wraz z dodatkowym modulem eksperymentalnym, został przedstawiony na rysunku 3.

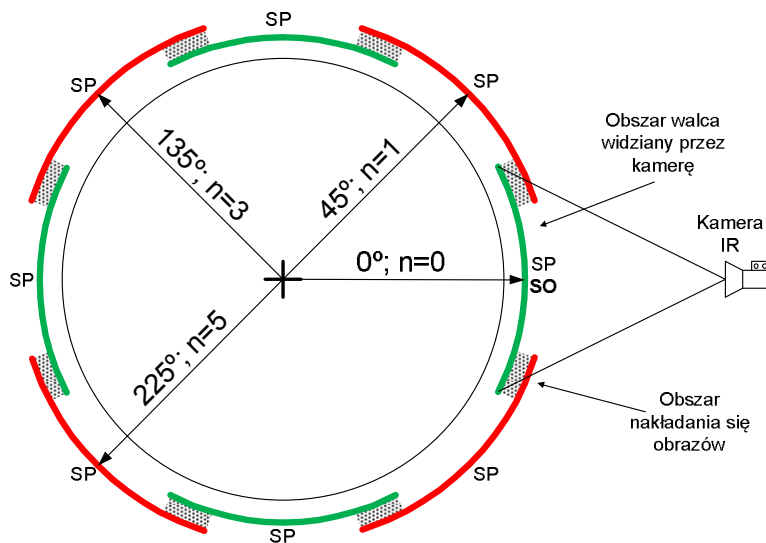


Rys. 3. Moduł synchronizacji enkodera z kamerą termowizyjną

Zaprojektowany i wykonany w ramach prac moduł synchronizacji wykorzystuje mikrokontroler Microchip dsPIC33FJ128MC706 oraz komunikuje się z komputerem PC za pomocą łącza USB (wykorzystywanego do odczytu bieżącej pozycji i prędkości). Schemat modułu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat modu synchronizacji



Rys. 5. Punkty synchronizacji ramek z kamery

Układ ten generuje dwa sygnały synchronizacji (raz na obrót walca oraz n razy na obrót), umożliwiające podpisywanie poszczególnych ramek w trakcie ich akwizycji w kamerze flagami ustawianymi w chwili wykrycia zbocza narastającego któregoś z sygnałów. Rysunek 5 przedstawia kątowy rozkład punktów

synchronizacji: **SO** oznacza synchronizację wykonywaną raz na obrót, **SP** oznacza synchronizację pośrednią, wykonywaną N razy na obrót.

W trakcie projektowania i implementacji algorytmu przyjęto 8 impulsów synchronizacji pośredniej SP na obrót (tzn. $n = 8$). Pozwoliło to podzielić powierzchnię walca na 8 częściowo nakładających się na siebie obszarów, oznaczonych kolorami: zielonym (ramka o numerze parzystym) oraz czerwonym (ramka o numerze nieparzystym), przesuniętych względem siebie o kąt 45° .

Dzięki dwóm typom impulsów synchronizujących oprogramowanie jest odporne na błędy transmisji, występujące przy pełnej prędkości akwizycji kamery, wymagającej od stacji roboczej przepustowości ok. 30MB/s.

Ostatecznie, na wyjściu bloku synchronizacji opracowanego algorytmu dostępne są sekwencje obrazów składające się z ośmiu kolejnych ramek. Taka przykładowa sekwencja została przedstawiona na rysunku 7.

3. REKONSTRUKCJA MAPY POWIERZCHNI

Algorytm rekonstrukcji powierzchni składa się z dwóch zasadniczych kroków. Pierwszym z nich jest wyeliminowanie wpływu naturalnego zakrzywienia powierzchni walcowej obserwowanego obiektu. Etap ten realizowany jest poprzez tzw. odwinięcie tekstury z ramki wejściowej, co można traktować jako operację odwrotną do tekstuowania 3D, znanego ze wszystkich środowisk i pakietów modelowania obrazów 3D. W algorytmie wykorzystany został trójwymiarowy model cylindra, dany wyrażeniem (1), który dla każdego punktu odwijanej tekstury wyznacza punkt w trójwymiarowej przestrzeni modelu o początku układu współrzędnych w punkcie środka ciężkości cylindra, tj. $Q(u,v)=[0\ 0\ 0]^T$.

$$Q(u,v) = \left[\frac{uC_L}{M_W} - \frac{1}{2}C_L; C_R \sin\left(2\pi\frac{v}{M_H}\right); C_R \cos\left(2\pi\frac{v}{M_H}\right) \right]^T \quad (1)$$

gdzie: u, v – współrzędne punktu w odwijanej teksturze o szerokości M_W i wysokości M_H , C_L – długość tworzącej cylindra, C_R – promień cylindra.

Ze wszystkich punktów danych wyrażeniem (1) wybierane są tylko te widoczne dla kamery. Widoczność określana jest na podstawie kąta między wektorem normalnym do powierzchni walca $QN(u,v)$ w punkcie $Q(u,v)$, danym wyrażeniem (2) a wektorem kierunku widzenia kamery (pokrywającej się z jej osią optyczną) $CD(u,v)$ w kierunku punktu $Q(u,v)$ – wyrażenie (3).

$$QN(u, v) = \left| 0 \quad \sin\left(2\pi \frac{v}{M_H}\right) \quad \cos\left(2\pi \frac{v}{M_H}\right) \right|^T \quad (2)$$

$$CD(u, v) = Q(u, v) + \begin{bmatrix} 0 & 0 & D \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

gdzie D jest odległością kamery od środka geometrii walca (od początku układu współrzędnych).

Ostatecznie, widoczność punktu jest określana przez znak wartości iloczynu skalarnego (2) i (3): gdy warunek (4) jest spełniony (co oznacza kąty z zakresu 90° - 270°), punkt uznawany jest za widoczny.

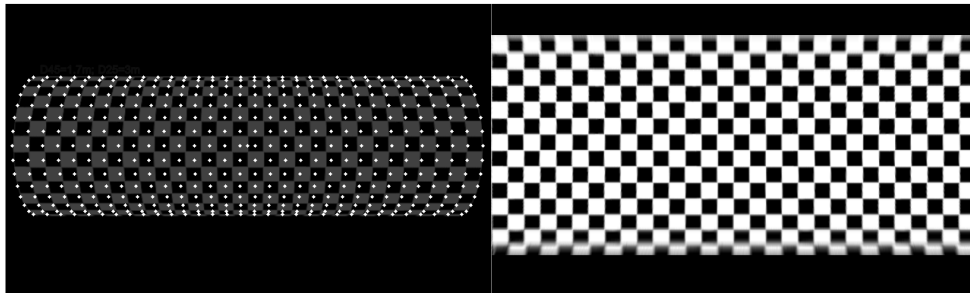
$$QN(u, v) \cdot CD(u, v) < 0 \quad (4)$$

Każdy z widocznych punktów $Q(u, v)$ jest następnie mapowany na obraz wejściowy z kamery termowizyjnej poprzez rzut perspektywiczny [5], dany wyrażeniem (5):

$$P^{input}(u, v) = \begin{bmatrix} \frac{fQ_x(u, v)}{f + Q_z(u, v)} & \frac{fQ_y(u, v)}{f + Q_z(u, v)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

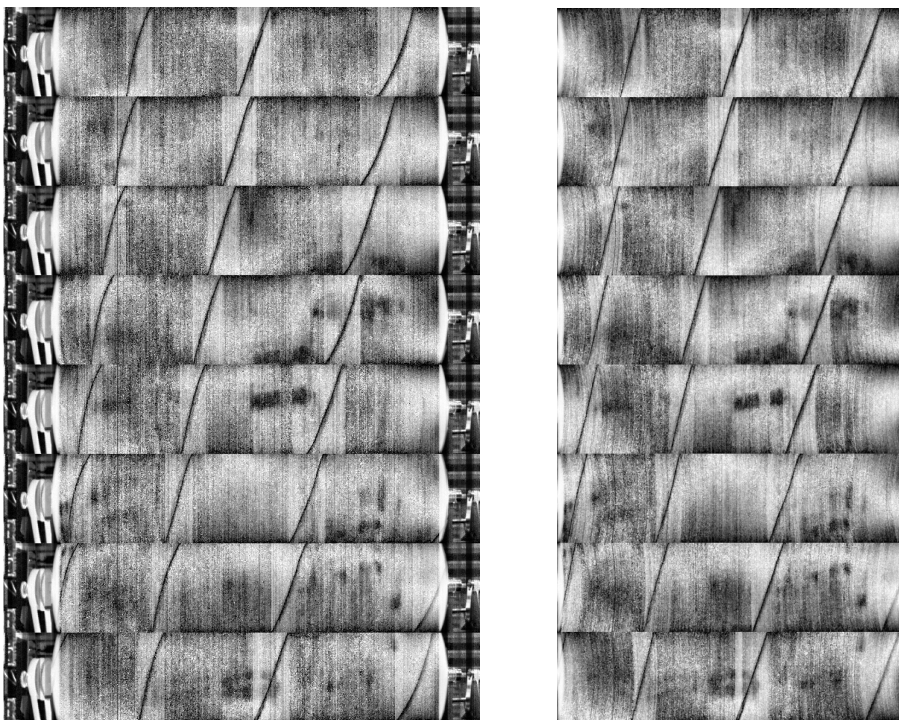
gdzie: P^{input} – współrzędne w ramce obrazu z kamery, f – ogniskowa kamery, indeksy dolne X, Y i Z oznaczają składowe wektora $Q(u, v)$.

Na rysunku 6 przedstawiono testową wizualizację walca z naniesionymi niektórymi punktami $P^{input}(u, v)$ oraz ostateczny wynik działania algorytmu odwijającego, tzn. teksturę wyjściową odzyskaną z syntetycznego obrazu wejściowego. Do wyznaczenia ostatecznej wartości punktu w teksturze wyjściowej wykorzystano interpolację dwuliniową.



Rys. 6. Model 3D walca z nałożoną mapą punktów (rysunek lewy); tekstura zdjęta z modelu 3D (rysunek prawy)

Rysunek 7 przedstawia wyniki operacji zdejmowania tekstury dla losowo wybranego bloku ramek (sekwencji ośmiu obrazów wejściowych). Dla lepszego zobrazowania skuteczności zaimplementowanego algorytmu w przedstawionych obrazach pokazano dodatkowy znacznik nawinięty na walec (czarna linia). Znacznik ten wyeksponowano poprzez indywidualną normalizację każdej z kolumn obrazu wejściowego, gdyż przy normalizacji całego obrazu, znacznik ten był bardzo słabo widoczny.



Rys. 7. Sekwencja 8 obrazów wejściowych ułożonych od najstarszego do najmłodszego (lewy rysunek); odwinięte tekstury z obrazów wejściowych (prawy rysunek)

W chwili, gdy gotowe są wszystkie tekstury z ramek w danej sekwencji, realizowany jest ostatni krok algorytmu rekonstrukcji. Jego zadaniem jest połączenie zestawu tekstur (takich jak przykładowe, przedstawione na rysunku 7) w jedną mapę rozkładu temperatury na powierzchni walca.

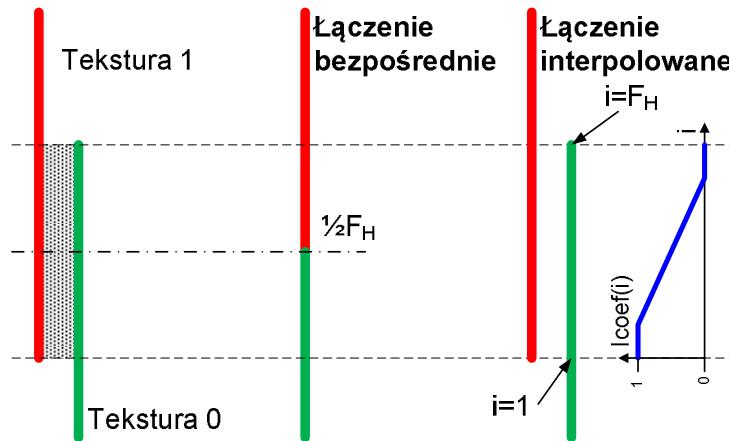
W algorytmie założono, że obszar powierzchni walca widziany przez kamerę jest na tyle duży w pionie, aby kolejne ramki z sekwencji nakładały się na siebie w górnej i dolnej części (co zilustrowano na rysunku 5). Zakładki te można wykorzystać na dwa sposoby przedstawione na rysunku 9.

Łączenie bezpośrednie: dla serii tekstur o jednakowych wysokościach, również wysokości zakładki są równe. Pozwala to na przycięcie tych zakładki w połowie ich wysokości, a następnie połączenie dwóch sąsiednich tekstur.

Łączenie interpolowane: dwie tekstury mogą być połączone na zakładkę z wykorzystaniem interpolacji liniowej, gwarantującej płynne przejście między nimi. Interpolacja wykonywana jest za pomocą funkcji przejścia $I_{coef}(i)$, przedstawionej na rysunku 8 i wykorzystanej w wyrażeniu (6):

$$M(i) = T_0(T_H - F_H + i)I_{coef}(i) + T_1(T_H - i)(1 - I_{coef}(i)) \quad (6)$$

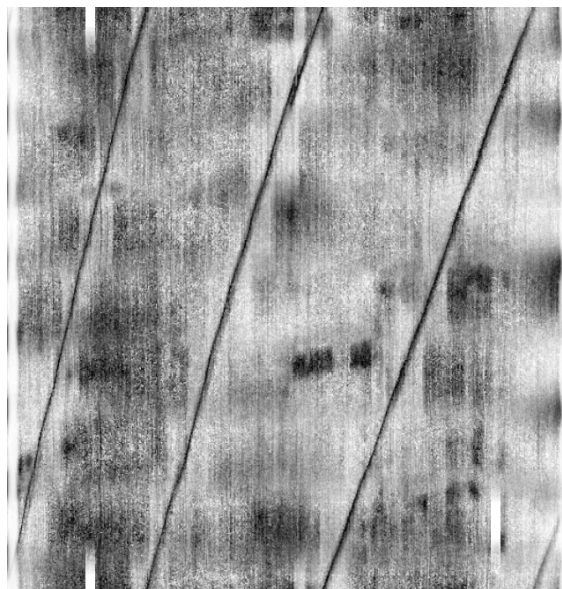
gdzie: $T_x(\bullet)$ – wiersz tekstury x , T_H – wysokość tekstury, F_H – wysokość zakładki.



Rys. 8. Łączenie bezpośrednie oraz interpolowane tekstur

Łatwo zauważyć, że łączenie bezpośrednie jest szczególnym przypadkiem łączenia interpolowanego, gdy funkcja przejścia ma charakter skokowy z 1 do 0 w punkcie $\frac{1}{2}F_H$, tj. w połowie wysokości zakładki.

Przykładowa mapa rozkładu temperatury na całej powierzchni walca uzyskana dla danych z rysunku 7 w wyniku realizacji opracowanego algorytmu została przedstawiona na rysunku 9.



Rys. 9. Mapa rozkładu temperatury na powierzchni walca po rekonstrukcji

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiony algorytm umożliwia przetworzenie strumienia danych pomiarowych generowanych przez kamerę termowizyjną w taki sposób, aby uzyskać pełen obraz rozkładu temperatury na powierzchni obracającego się i nagrzewanego walca, dysponując jedynie chwilowymi obrazami tego obiektu w różnych fazach jego ruchu. Strumień dzielony jest na bloki z uwzględnieniem ewentualnych błędów komunikacji oraz z wykorzystaniem impulsów synchronizacyjnych w celu oznaczenia położenia kąowego poszczególnych ramek. Sekwencja N oznaczonych ramek poddana jest przetwarzaniu polegającemu na wyeliminowaniu wpływu krzywizny walca, a następnie rekonstruowana jest kompletna mapa rozkładu temperatury na powierzchni walca. Tak wygenerowana mapa może zostać wykorzystana w algorytmach regulacji profilu temperatury na powierzchni walca oraz jako warunek początkowy modelu nagrzewania.

PODZIĘKOWANIA

Badania te były częściowo finansowane z projektu badawczego N N519 579838 Polskiego Narodowego Centrum Nauki.

LITERATURA

- [1] **Urbanek P., Kucharski J.:** Modelling of dynamic properties of induction heated rotating steel cylinder, Proceedings of the 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 2007.
- [2] http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/100930%20A615%20datasheet_en.pdf (stan z 22/07/2012).
- [3] **Cho C.-Y., Chen T.-M., Wang W.-S., Liu C.-N.:** Real-Time Photo Sensor Dead Pixel Detection for Embedded Devices Digital Image Computing Techniques and Applications (DICTA), 2011 International Conference on, 2011, 164-169.
- [4] **Jaworski T., Kucharski J.:** Fuzzy spatial relations-based markers location on in images from an infrared camera, Zeszyty Naukowe AGH, Automatyka, 2012.
- [5] **Cyganek B.:** Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych Exit, 2002.

AN ALGORITHM FOR FULL TEMPERATURE MAP RECONSTRUCTION FROM IR IMAGE STREAM OF ROTATING STEEL CYLINDER

Summary

The following paper presents an algorithm developed to reconstruct a full temperature distribution map of a rotating steel roller's surface. The surface is constantly monitored by an IR camera that produces a stream of frames. Frame acquisition is triggered by a set of equidistant angles used by electronic synchronization module. Received stream is divided into blocks with equal number of frames in each and for every valid block a reconstruction algorithm is executed. Finally, a full temperature map for entire circumference of the cylinder is obtained.

Keywords: image processing, thermal imaging rotating steel cylinder, synchronization.