

Porównanie wybranych metod śledzenia markerów przeznaczonych dla lokalizatorów wizyjnych

Streszczenie. W pracy zaprezentowano trzy metody detekcji i śledzenia markerów oraz ich ocenę pod kątem możliwości wykorzystania w lokalizatorze wizyjnym wyposażonym w miniaturową kamerę. Zastosowano dwa warianty wyznaczenia położenia markera, bazujące na momentach geometrycznych oraz na dopasowaniu elipsy. Przyspieszono też działanie algorytmu ograniczając wymagające obliczeniowo operacje do okna podążającego za markerem, którego położenie wyznaczone jest za pomocą algorytmu CAMSHIFT. Otrzymane wyniki wykazały, że błąd RMS dopasowania elipsy jest o 0,02 piksela mniejszy od błędu wyznaczenia centroidu, jednak metoda elipsy jest bardziej wrażliwa na obrót obrazu. Dzięki zastosowaniu śledzenia w oknie obliczeniowym czas detekcji uległ skróceniu z 8% do 1% całkowitego czasu przetwarzania obrazu.

Abstract. In this work, we present a comparison of three methods for detection and tracking of markers, and the assessment of these methods in terms of potential application in a miniature camera localizer. We use two approaches for determining position of the marker, first based on image centroid and second based on fitting of an ellipse. We also speed up data processing by confining the computationally intensive operations to a window, the position of which is determined by the CAMSHIFT algorithm. The results of the comparison show, that the RMS error for the ellipse method is smaller than that obtained by the centroid by 0.02 pixels. However, the ellipse method is more prone to errors caused by rotation of the image. By applying a computational window we can reduce the time of detection from 8% to 1% of total processing time. (A comparison of tracking methods for optical localizers).

Słowa kluczowe: lokalizatory wizyjne, rozpoznawanie obrazów, CAMSHIFT

Keywords: optical tracking systems, computer vision, CAMSHIFT

doi:10.12915/pe.2014.05.22

Wstęp

Lokalizatory wizyjne umożliwiają pomiary położenia na podstawie obrazów z kamer. Najczęściej stosowaną metodą pomiaru jest umieszczenie na mierzonej strukturze fizycznego obiektu (markera) o odróżniających go od otoczenia cechach. Lokalizacja punktu definiowanego przez marker jest możliwa poprzez pomiar położenia projekcji markera na obrazie z kamer, przy znajomości transformacji pomiędzy płaszczyznami obrazowania. Detekcja i lokalizacja markera na obrazie decydują więc o właściwościach użytkowych całego systemu.

Lokalizatory wizyjne stosowane są w wielu dziedzinach techniki, włączając w to także inżynierię biomechaniczną, w szczególności biomechanikę i komputerowe wspomaganie chirurgii. W neurochirurgii [1] i chirurgii ortopedycznej [2] ich zadaniem jest odniesienie rzeczywistej sytuacji w polu operacyjnym do założeń, określonych np. na podstawie przedoperacyjnej tomografii komputerowej.

Szybki rozwój w dziedzinie elektroniki użytkowej, zwłaszcza w segmencie urządzeń mobilnych (takich jak smartfony i tablety) jest źródłem coraz lepszej jakości kamer CCD. Kamery te można wykorzystać do budowy miniaturowego lokalizatora przeznaczonego do pomiarów poza polem widzenia lokalizatora stacjonarnego.

Celem niniejszej pracy było opracowanie i zbadanie metod, przy pomocy których możliwa jest szybka i dokładna detekcja markera na obrazie miniaturowej kamery. Zaproponowano koncepcję markera oraz automatyczne metody jego śledzenia. Podjęto próbę optymalizacji tych metod pod względem szybkości działania, ograniczając wymagające obliczeniowo operacje do okna podążającego za markerem. Zbadano dokładność i powtarzalność dwóch metod wyznaczenia położenia markera polegających na: (i) wyznaczeniu centroidu pikseli należących do markera oraz (ii) dopasowaniu do markera elipsy i znalezieniu jej środka.

Wyniki eksperymentalne uzyskano implementując zaproponowane metody w środowisku Matlab®. W testach wykorzystano obrazy pochodzące z miniaturowej kamery montowanej w telefonie komórkowym. Zastosowanie ruchomego okna redukuje czas potrzebny na detekcję markera z 8% do 1% całkowitego czasu przetwarzania obrazów. Metoda lokalizacji za pomocą elipsy okazała się bardziej dokładna. Wyniki uzyskane metodą centroidu wykazują większą niezależność od kąta obrotu sceny.

Wymagania dla algorytmów śledzenia markerów

Wymagania dla algorytmów śledzenia markerów na obrazie formułowane są w kategoriach dokładności i szybkości działania. Dokładność zależy od: (i) szumu kwantyzacji poziomów luminancji, (ii) różnic między właściwościami geometrycznymi markera a właściwościami jego projekcji na płaszczyznę 2D, (iii) geometrii kamery oraz (iv) efektów sprzętowych związanych z synchronizacją odczytywania pikseli podczas akwizycji obrazu [3]. Szybkość działania, rozumiana jako czas potrzebny na wyznaczenie położenia markera, ograniczona jest częstotliwością akwizycji obrazu. Wpływa na nią także czas przetwarzania pojedynczej klatki obrazu przez procedury detekcji i lokalizacji.

Sprecyzowanie wymagań dotyczących dokładności pozycjonowania markera na obrazie kamery jest trudne, ponieważ sposób, w jaki dokładność ta przekłada się na dokładność lokalizatora zależy od wielu parametrów konstrukcyjnych. Zaliczają się do nich parametry optyczne kamery, ich liczba i rozmieszczenie, oraz jakość kalibracji (czyli dokładność, z jaką to rozmieszczenie jest znane).

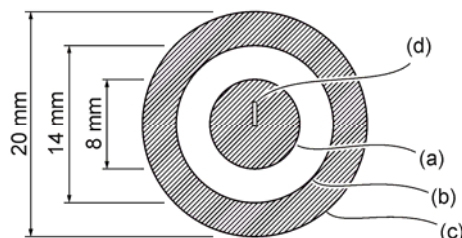
Częstotliwość próbkowania komercyjnych lokalizatorów wizyjnych wykorzystywanych do zastosowań medycznych wynosi od 20 do 60 Hz. Do czasu akwizycji obrazu należy jeszcze doliczyć opóźnienie związane z przetwarzaniem obrazu o wartości rzędu kilkudziesięciu milisekund [4]. Pełna lokalizacja wszystkich markerów znajdujących się na obrazie nie powinna zatem zajmować więcej niż 100 ms od momentu rozpoczęcia akwizycji obrazu.

Podstawowe znaczenie dla szybkości detekcji i lokalizacji markerów ma dobór algorytmów przetwarzania obrazu. W celu zapewnienia wymaganej dokładności można natomiast zminimalizować błąd projekcji poprzez dobór odpowiedniej konstrukcji markera.

Najprostszymi do wykonania są markery planarne. Wśród nich najlepszą dokładność dają markery kołowe [5]. Kształt kołowy upraszcza też procedurę detekcji, ponieważ trójwymiarowa projekcja okręgu na płaszczyznę posiada środek symetrii, który można wyznaczyć stosując prostą metodę momentów geometrycznych. Wadą markerów planarnych jest jednak to, że środek trójwymiarowej projekcji znajduje się w innym miejscu niż punkt odpowiadający rzeczywistemu środkowi markera, co prowadzi do błędów wyznaczenia położenia [5].

Koncepcja markera i metody jego lokalizacji

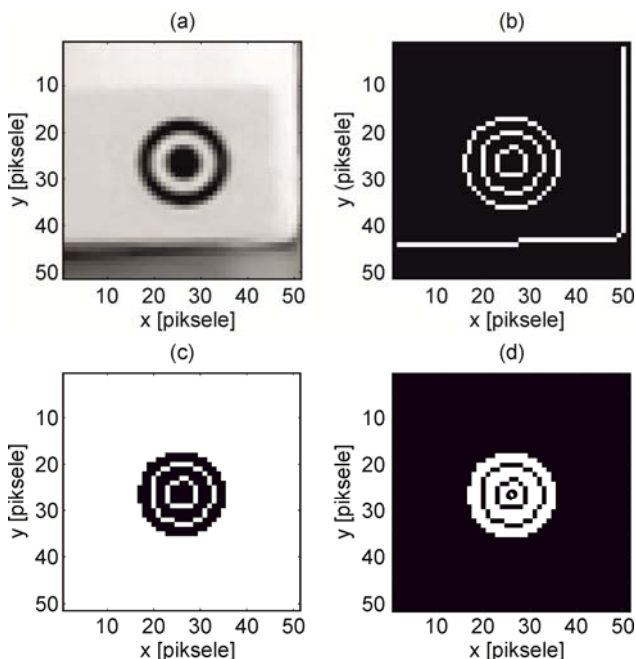
Na potrzeby przeprowadzonych eksperymentów zaproponowano płaski pasywny marker o symetrii środkowej. Składa się on z dwóch czarnych pól – pierścienia i koła – umieszczonych współśrodkowo na białym tle (rys.1). Dodatkowo wewnątrz okręgu znajduje się białe pole umożliwiające ręczne określenie położenia markera na obrazie (element d).



Rys.1. Proponowana koncepcja markera: (a), (b), (c) krawędzie, (d) dodatkowy znacznik umożliwiający ręczne określenie położenia środka markera na obrazie.

Proces przetwarzania obrazu podzielono na dwa etapy: detekcji, którego zadaniem jest znalezienie na obrazie obszaru zawierającego marker i lokalizacji, służącej określeniu dokładnego położenia markera na podstawie wyników detekcji.

Pierwszym krokiem wykonywanym na etapie detekcji jest wykrywanie krawędzi za pomocą algorytmu Canny'ego. (rys.2b). Następnie otwarte krawędzie usuwane są z obrazu za pomocą morfologicznej operacji wypełnienia, zainicjalizowanej na krawędziach obrazu (rys.2c). W trzecim kroku usuwane są z obrazu obiekty, których wielkość lub współczynnik kształtu nie odpowiadają wartościom spodziewanym dla markera. Ostatni krok detekcji ma charakter strukturalny. Po operacji wypełnienia marker składa się z trzech położonych koncentrycznie obszarów. Badane są więc odległości pomiędzy centroidami wszystkich par wybranych spośród pozostałych na obrazie obszarów. Obszary, których centroidy położone są dostatecznie blisko są grupowane i klasyfikowane jako znajdujące się w obrębie tego samego markera (rys.2d).



Rys.2. Detekcja markera: (a) obraz oryginalny, (b) detekcja krawędzi, (c) usuwanie otwartych krawędzi, (d) grupowanie centroidów rozłącznych obszarów. Centroidy oznaczono przez „o”.

Do wyznaczania dokładnego położenia wykrytego markera zastosowano dwie metody. W pierwszej z nich posłużono się momentami geometrycznymi, za pomocą których już na etapie detekcji można obliczyć położenie centroidu projekcji markera. Druga z metod polega na dopasowaniu do markera elipsy i następnie wyznaczeniu jej środka.

Położenie centroidu (x_c, y_c) obiektu na obrazie binarnym $I[x,y]$, w którym piksele należące do tego obiektu przyjmują wartość „1” a wszystkie pozostałe piksele – wartość „0”, można wyznaczyć za pomocą momentów geometrycznych M_{00} , M_{01} i M_{10} obrazu. Szukane współrzędne centroidu dane są ilorazami odpowiednich momentów:

$$(1) \quad x_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} = \frac{\sum_{(x,y) \in I} xI[x,y]}{\sum_{(x,y) \in I} I[x,y]}, \quad y_c = \frac{M_{10}}{M_{00}} = \frac{\sum_{(x,y) \in I} yI[x,y]}{\sum_{(x,y) \in I} I[x,y]}$$

W nawiązaniu do drugiej z metod lokalizacji markera rozważmy dyskretny obraz binarny $I[x,y]$ zawierający elipsę, o wartościach luminancji równych 0 dla pikseli położonych wewnątrz i wartościach równych 1 dla pikseli położonych na zewnątrz tej elipsy. Wartości luminancji takiego obrazu można opisać ogólnie za pomocą nieliniowej funkcji dwóch zmiennych:

$$(2) \quad h_\theta(x,y) = \frac{1}{1 + \exp(-f(x,y))}$$

gdzie funkcja wewnętrzna $f(x,y)$ dana jest ogólnym równaniem krzywej stożkowej:

$$(3) \quad f(x,y) = \theta_0 + \theta_1x + \theta_2y + \theta_3xy + \theta_4x^2 + \theta_5y^2$$

Problem dopasowania elipsy do kształtu na obrazie $I[x,y]$ sprowadza się do znalezienia zestawu parametrów $\theta_0 \dots \theta_5$. Parametry te powinny minimalizować funkcję kosztu:

$$(4) \quad J(\theta_0 \dots \theta_5) = \frac{1}{2m} \sum_{[x,y] \in I} (h_\theta[x,y] - I[x,y])^2$$

gdzie m jest całkowitą liczbą pikseli w obrazie $I[x,y]$. W implementacjach opisywanych w niniejszej pracy do znalezienia minimum funkcji kosztu wykorzystano metodę gradientu, której szczegółowy opis można znaleźć w pracy Boutou [6]. Na podstawie znalezionych wartości parametrów funkcji (3) $\theta_0 \dots \theta_5$ obliczany jest środek elipsy.

Do każdego z markerów dopasowywane są dwie elipsy, odpowiadające najbardziej zewnętrznym krawędziom (b) i (c) na rysunku 1. Krawędzie te rozdzielane są za pomocą operacji morfologicznych. Położenie markera obliczane jest jako średnia odpowiednich współrzędnych środków elips. W zaprezentowanej wersji zarówno metoda momentów geometrycznych jak i metoda dopasowania elipsy dają wyniki obarczone wspomnianym wyżej błędem projekcji.

Jako alternatywne rozwiązania dla problemu lokalizacji i detekcji markera rozważano także inne algorytmy przetwarzania obrazów: metodę aktywnego konturu [7] i transformację Hougha [8]. Z przeprowadzonych dodatkowo badań, których szczegółowe wyniki nie mogą być przytoczone ze względu na ograniczone ramy tej pracy wynika jednak, że transformacja Hougha o 5-wymiarowej przestrzeni parametrów potrzebnej do reprezentacji elipsy spowalnia detekcję markera co najmniej dwukrotnie w porównaniu z przedstawioną wyżej metodą dopasowania elipsy. Z kolei zastosowanie metody aktywnego konturu wymaga odpowiedniego wyboru punktów startowych, co

jest skomplikowane w przypadku automatycznego śledzenia i może dodatkowo spowalniać działanie algorytmu. Ponieważ w swojej klasycznej wersji metoda aktywnego konturu nie czyni żadnych założeń odnośnie kształtu poszukiwanego obiektu, jej wynik jest też podatny na istnienie wyraźnych krawędzi niezwiązanych z tym obiektem.

Algorytm śledzenia markera

W celu zwiększenia wydajności obliczeniowej dokładną detekcję i lokalizację markera można przeprowadzać w oknie, korygując znalezione współrzędne o współrzędne położenia tego okna w obrazie. Do wyznaczenia położenia okna zastosowano adaptacyjny algorytm śledzenia CAMSHIFT (ang. *Continuously Adaptive Mean Shift*) [9]. Algorytm ten poszukuje centroidu wewnątrz analizowanego okna. Na podstawie znajdującego centroidu obliczane jest nowe położenie okna, które wykorzystywane jest do obliczeń w klatce następnej. Aktualizacji podlega także rozmiar okna, który jest dobierany w zależności od wartości momentu M_{00} wewnątrz okna.

Korzystając z przedstawionych powyżej narzędzi zaprojektowano trzy warianty algorytmu śledzenia markera, różniące się między sobą metodą lokalizacji markerów i zastosowaniem elementów algorytmu CAMSHIFT (rys.3). W pierwszym z wariantów (rys.3a) detekcja wykonywana jest bez użycia okna obliczeniowego, a lokalizacja – metodą dopasowania elips. W dwóch pozostałych wariantach (rys.3b) wykorzystano ruchome okno obliczeniowe, przy czym w jednym z nich zastosowano do lokalizacji metodę dopasowania elipsy, zaś w drugim położenie markera wyznaczone jest bezpośrednio jako centroid jego projekcji na obrazie metodą momentów geometrycznych.

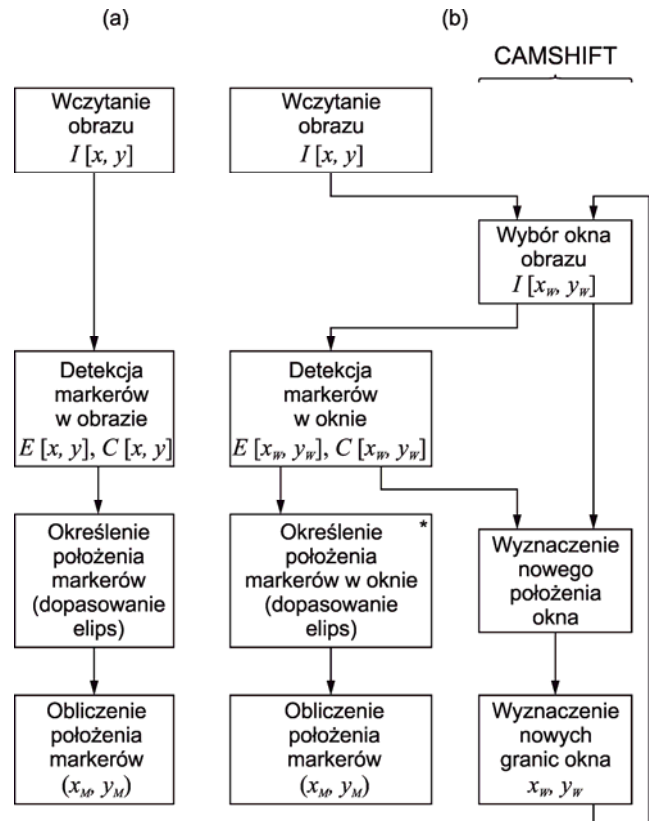
Testy zaproponowanych metod

Algorytmy śledzenia markerów opisane w poprzedniej sekcji zaimplementowano w środowisku Matlab® R2013a i uruchamiano na komputerze z 4-rdzeniowym procesorem Intel® Core i5 o częstotliwości taktowania 3,1 GHz i 2GB pamięci RAM. Źródłem analizowanych obrazów była kamera zainstalowana w telefonie komórkowym HTC Evo 3D o ogniskowej 4,31 mm i rozdzielczości 640 na 360 pikseli. Urządzenie zamontowano na statywie, nieruchomo względem obserwowanej sceny. Marker nadrukowano na sztywnej płytce i przemieszczano ręcznie tak, jak pokazuje to rysunek 4.

W ramach przeprowadzonych testów badano trzy aspekty związane z działaniem zaimplementowanych metod: (i) czas wykonywania poszczególnych sekcji algorytmu, (ii) podatność metody lokalizacji na błąd związany z nachyleniem markera względem płaszczyzny obrazowania oraz (iii) wrażliwość lokalizacji na obrót obrazu o zadany kąt. W pierwszym z wymienionych testów porównywano ze sobą trzy algorytmy przedstawione w poprzedniej sekcji. Dwa pozostałe testy dotyczyły porównania samych metod lokalizacji. W pierwszym z testów badano czas wykonywania algorytmów śledzenia uruchomionych na sekwencji wideo o długości 492 klatek.

Podczas badania podatności na występowanie błędów projekcji wyniki uzyskane za pomocą testowanych metod odniesiono do wyników pomiarów ręcznych, wykorzystując wspomniany wcześniej dodatkowy element markera (element d na rysunku 1). Porównanie przeprowadzono dla sekwencji składającej się z 459 klatek obrazu. Rozbieżności w stosunku do danych referencyjnych obliczono jako odległość rms:

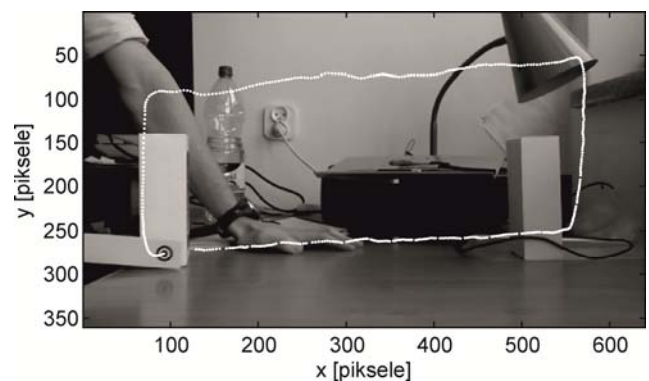
$$(5) \quad \langle \varepsilon \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta x^2 + \Delta y^2)},$$



Rys.3. Schematy zaproponowanych algorytmów śledzenia markerów: (a) detekcja w pełnej klatce obrazu i lokalizacja metodą elipsy, (b) detekcja w oknie wyznaczanym metodą CAMSHIFT. Algorytm (b) zaimplementowano w dwóch wariantach. Pierwszy z nich dokonuje lokalizacji metodą dopasowania elipsy wykorzystując blok oznaczony (*). Drugi nie wykorzystuje tego bloku a lokalizacja przeprowadzana jest bezpośrednio na podstawie momentów geometrycznych. Oznaczenia: $I[x,y]$ – obraz, (x_w, y_w) – piksele należące do okna, $E[x,y]$ – obraz binarny zawierający krawędzie, $C[x,y]$ – obraz binarny przyjmujący wartość 1 tylko dla pikseli należących do markera.

gdzie N jest liczbą wszystkich klatek obrazu a Δx i Δy są różnicami pomiędzy odpowiednimi współrzędnymi uzyskanymi metodami badaną i referencyjną.

W trzecim teście zbadano stabilność metod lokalizacji markerów względem obrotu obrazu. W tym celu wyznaczono trajektorię markera na sekwencjach obróconych o 60°, 120°, 180°, 240° i 300° względem położenia początkowego. Wyznaczone położenia punktów obrócono następnie o ten sam kąt z przeciwnym znakiem i porównano z trajektorią uzyskaną dla nie obróconej sekwencji używając zależności (5).



Rys.4. Przykładowa trajektoria markera zarejestrowana za pomocą zaproponowanego algorytmu przedstawiona na tle ostatniej klatki analizowanej sekwencji wideo.

Wyniki testów i ich dyskusja

Z pomiarów czasu wykonywania się poszczególnych algorytmów wynika, że zdecydowanie najszybciej wykonuje się implementacja algorytmu w którym zastosowano metodę CAMSHIFT z lokalizacją bazującą na centroidzie zaś najwolniej – procedura pracująca na pełnowymiarowej klatce obrazu wykorzystująca do lokalizacji metodę dopasowania elipsy (tab.1). Dopasowanie elipsy jest najbardziej wymagającym obliczeniowo etapem śledzenia markera i stanowi od 87% do 92% całego czasu przetwarzania w metodach, które je wykorzystują.

Czas detekcji markerów w pełnym obrazie wynosi 119 ms (8% całkowitego czasu przetwarzania), a w przypadku obliczeń w oknie jest on zredukowany do 11 ms (1% czasu przetwarzania). Prowadzenie obliczeń w oknie w mniejszym stopniu redukuje czas potrzebny na dopasowanie elipsy, ponieważ operacja ta i tak wykonywana jest lokalnie. Wyniki uzyskane dla detekcji lokalnej z lokalizacją na podstawie momentów potwierdzają bardzo dużą szybkość działania. Detekcja i lokalizacja zajmują łącznie w tym przypadku jedynie 10 ms.

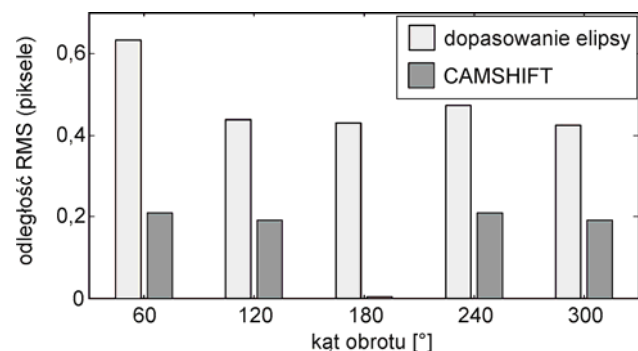
Tabela 1. Czas wykonywania poszczególnych etapów dla trzech wariantów algorytmu śledzenia markerów zaimplementowanego w środowisku MATLAB. Wszystkie wartości bezwzględne podano w milisekundach w przeliczeniu na jedną klatkę obrazu.

| | Elipsa | | Elipsa + CAMSHIFT | | CAMSHIFT |
|-----------------------|-------------|-------|-------------------|-------|------------|
| Wczytywanie obrazu | 72 | (5%) | 53 | (4%) | 50 (48%) |
| Detekcja markerów | 119 | (8%) | 11 | (1%) | 10 (9%) |
| Dopasowanie elipsy | 1244 | (87%) | 1182 | (92%) | — |
| Pozostałe | 1 | (0%) | 44 | (3%) | 45 (43%) |
| Czas całkowity | 1436 | | 1290 | | 105 |

Wyznaczony błąd rms badanych metod lokalizacji wynosi 0,72 piksela dla metody dopasowania elipsy i 0,74 piksela dla metody centroidu. Wyniki badań stabilności metody lokalizacji względem obrotu pokazują natomiast, że metoda lokalizacji za pomocą dopasowania elipsy jest zdecydowanie bardziej wrażliwa na orientację obrazu (rys.5).

Podsumowanie

W pracy zaprezentowano trzy algorytmy śledzenia markerów na obrazie kamery, skonstruowane poprzez połączenie metod detekcji i lokalizacji markerów oraz adaptacyjnego śledzenia obiektów metodą CAMSHIFT. Implementacje tych algorytmów porównano pod względem szybkości działania, a zastosowane metody lokalizacji – pod względem dokładności oraz powtarzalności przy różnych orientacjach obrazu.



Rys.5. Odległość rms pomiędzy położeniami markera otrzymanymi z obrazu nieobróconego i położeniami otrzymanymi po obrocie obrazu o zadany kąt dla dwóch badanych metod lokalizacji.

Otrzymane wyniki pokazują, że algorytm CAMSHIFT pozwala na skrócenie czasu potrzebnego na określenie położenia markerów w klatce obrazu. Wyniki dotyczące dokładności świadczą o tym, że metoda dopasowania elipsy do krawędzi markera pozwala na zlokalizowanie go z nieco większą dokładnością niż metoda wyznaczania centroidu. Wyniki dotyczące powtarzalności przemawiają jednak na korzyść metody wyznaczania centroidu.

Stosunkowo niewielka przewaga lokalizacji metodą elipsy pod względem dokładności (0,02 piksela rms) wobec ponad 10-krotnie krótszego czasu przetwarzania w przypadku lokalizacji na podstawie centroidu przemawia zdecydowanie na korzyść drugiej z wymienionych metod, zwłaszcza, jeśli rozważana jest implementacja algorytmu detekcji na platformie sprzętowej o ograniczonych możliwościach obliczeniowych. Przeprowadzone badania wykazały także dużo wyższą powtarzalność lokalizacji na podstawie centroidu w przypadku obrotu analizowanej sceny w porównaniu z metodą lokalizacji bazującą na dopasowaniu elipsy.

Metoda lokalizacji za pomocą centroidu, choć lepsza od konkurencyjnej testowanej metody, nie jest pozbawiona wad. Jedną z nich jest wspomniany już błąd związany z wyznaczeniem środka okręgu na podstawie jego przestrzennej projekcji na płaszczyznę. Możliwość wyeliminowania tego błędu bez dodatkowych założeń dotyczących kształtu projekcji są ograniczone.

W dalszych badaniach celowe wydaje się zbadanie wpływu zwiększenia liczby markerów na szybkość działania w metodzie wykorzystującej okno oraz implementacja najlepiej sprawdzających się wariantów na docelowej platformie sprzętowej. Poza ograniczeniami narzucanymi przez jakość obrazu z miniaturowych kamer CCD możliwe byłoby wówczas bezpośrednie badanie ograniczeń związanych z szybkością obliczeń.

LITERATURA

- [1] Delp S., Stulberg B., Davies B., Picard F., Leitner F, Computer-Assisted Knee Replacement, *Clinical Orthopaedics* 3 (1998) nr 54 49-56.
- [2] Peters T., Cleary K. Image-Guided Interventions. Technology and Applications. Rozdział 11. Neurosurgical Applications, *Springer Science+Business Media* (2007).
- [3] Sklair C., Hoff W., Gatrell L., Accuracy of Locating Circular Fiducial Features Using Machine Vision, *Proceedings of SPIE Conference on Intelligent Robotic Systems*, 1612 (1992) 222-234.
- [4] Ernst F., Schlaefler A., Schweikward, A., Smoothing of respiratory motion traces for motion-compensated radiotherapy, *Medical Physics*, 37 (2011) nr 1 282-294.
- [5] Bose C., Amir I., Design of Fiducials for Accurate Registration Using Machine Vision, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 12 (1990) nr 12 1196-1200.
- [6] Boutou L., Stochastic Learning, *Advanced Lectures on Machine Learning*, Springer-Verlag (2003) 146-168.
- [7] Xu C., Prince J., Snakes, shapes, and gradient vector flow. *IEEE Transactions on Image Processing*, 7 (1998) nr 3 359-369.
- [8] Xie Y., Ji, Q., A new efficient ellipse detection method. *Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition*, 2 (2002)
- [9] Bradski G., Computer Vision Face Tracking for Use in a Perceptual User Interface, *Intel Technology Journal* Q2 (1998).

Autor: mgr inż. Adrian Goral, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Metrologii i Elektroniki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: adrian.goral@agh.edu.pl.