

Andrzej JONKOWSKI
Piotr COFAŁKA

KALIBRACJA URZĄDZEŃ W SYSTEMACH ILOŚCIOWEJ ANALIZY OBRAZÓW

Streszczenie. W pracy opisano kilka algorytmów kalibracji dwóch rodzajów urządzeń rastrowych: kamery monochromatycznej oraz tabliczki graficznej (ang. tablet digitizer). Przedstawiono także sposób wykorzystania danych z kalibracji do pomiarów odległości występujących w dwuwymiarowej scenarii rzeczywistej na podstawie odwzorowanych współrzędnych punktów w tej scenarii, a także metodologię obliczania błędów pomiarowych. Omówiono również czynniki ograniczające dokładność pomiarów wykonywanych za pomocą tych urządzeń.

INPUT DEVICE CALIBRATION IN QUANTITATIVE IMAGE ANALYSIS SYSTEMS

Summary. The article presents some algorithms of calibration for two kinds of raster devices: monochrome cameras and tablet digitizers. It is explained how calibration data can be used for distance measurement in the 2D real scene based on image-plane coordinates of points belonging to the scene. Error assessment methodology is discussed. Factors limiting measurement precision using these devices are described.

CALIBRATION DES DISPOSITIFS D'ENTRÉE DANS DES SYSTÈMES D'ANALYSE QUANTITATIVE D'IMAGES

Résumé. L'article présente quelques algorithmes de calibration pour deux types de dispositifs d'entrée: les cameras matricielles et les tablettes graphiques. Il explique comment les données de calibration peuvent être utilisées pour mesurer des distances dans une scène réelle 2D à la base des coordonnées images des points de la scène. Les méthodes d'évaluation de l'erreur sont discutées. Les paramètres limitant la précision de mesure par l'intermédiaire de ces dispositifs sont aussi présentés.

1. Wprowadzenie

W komputerowych systemach przetwarzania obrazów obraz cyfrowy może być poddany analizie jakościowej, jak również ilościowej. Wynikiem analizy ilościowej zwykle jest liczba lub wektor liczb będących rezultatem pomiarów różnych cech obiektów fizycznych na obrazie, np. długości obiektu, temperatury określonego fragmentu (na obrazie termowizyjnym) i in.

W ilościowej analizie obrazów występują dwa rodzaje systemów cyfrowych:

- automatyczne - analizujące obraz według zaprogramowanych algorytmów, w których ingerencja człowieka sprowadza się co najwyżej do wybierania opcji z menu dotyczącej np. rodzaju przeprowadzanej analizy,
- półautomatyczne - w tych systemach rola człowieka-eksperta jest znacznie większa, gdyż w przebiegu analizy pewne jej etapy musi wykonać "ręcznie" (np. obrysować pewien fragment obrazu, zaznaczyć punkty na obrazie itp.) - [2].

Jednym z zastosowań komputerowych systemów analizy ilościowej obrazów jest pomiar cech geometrycznych obiektów rzeczywistych. Informacją konieczną do ich wyznaczenia są współrzędne obiektów mierzonych w przestrzeni względem pewnego założonego początku układu współrzędnych. W praktyce będą to współrzędne obiektów w przestrzeni odwzorowującej rzeczywistość (np. przestrzeń obrazu cyfrowego) oraz współczynniki kalibrujące - określające, jak przestrzeń odwzorowująca ma się do rzeczywistej.

Do uzyskania współrzędnych punktów do pomiarów w skrajnym przypadku nie jest wymagany obraz cyfrowy. W niektórych zastosowaniach wystarczające mogą być wprowadzone same punkty, np. za pomocą tabliczki graficznej*, zwłaszcza że tego typu urządzenia zwykle są znacznie tańsze od urządzeń akwizycji obrazów takich jak kamera.

* Tabliczka graficzna - angielska nazwa *Tablet Digitizer*. W polskich publikacjach można spotkać nazwy: stolik cyfrowy lub digitajzer.

Na podstawie obrazu cyfrowego, a nawet wprowadzonych samych współrzędnych potrzebnych punktów, można dokonać pomiarów m.in. następujących cech geometrycznych obiektów rzeczywistych:

- ♦ wysokości i szerokości,
- ♦ pola,
- ♦ obwodu,
- ♦ średnicy minimalnej i maksymalnej.

Celem niniejszej pracy jest podanie pewnych algorytmów kalibracji dwóch istotnie różnych urządzeń odwzorowujących przestrzeń rzeczywistą: kamery i tabliczki graficznej. Przeprowadzając pomiary za pomocą tych urządzeń należy brać pod uwagę wprowadzane przez nie błędy, a także błędy kalibracji.

2. Akwizycja danych

2.1. Układy akwizycji

W niniejszej pracy rozpatrywane będą dwa układy akwizycji danych wykorzystywanych do pomiarów cech geometrycznych:

- ♦ tor wizyjny z kamerą przemysłową CCD* - uzyskiwane dane pomiarowe w postaci obrazu cyfrowego, który wymaga dalszej obróbki w celu uzyskania współrzędnych obiektów występujących na obrazie,
- ♦ układ pomiarowy z tabliczką graficzną - gdzie wprowadzane dane są współrzędnymi generowanymi przez tabliczkę.

W obu przypadkach będziemy mieli do czynienia z dwuwymiarową przestrzenią odwzorowującą, przy czym dla kamery rejestrowana scena może być dwu- lub trójwymiarowa, natomiast dla tabliczki graficznej - tylko dwuwymiarowa.

W obu przypadkach docelowymi danymi uzyskiwanymi w wyniku akwizycji danych będą współrzędne x-y pikseli** interesujących użytkownika systemu punktów pomiarowych.

* Przetwornik CCD - element optoelektroniczny wykonany w postaci matrycy elementów światłoczułych (komórki o sprzężeniu ładunkowym - Charge Coupled Device) - fotodiod lub tranzystorów MOS w jednej płytce półprzewodnika o powierzchni kilku mm². Opis tego typu elementów można znaleźć m.in. w [6], [9].

** Piksel - najmniejsza porcja powierzchni obrazu reprezentowana w systemach komputerowych jako pojedynczy element obrazu cyfrowego (skrót od angielskiego *Picture Element* - element obrazu). W niniejszej pracy piksel oznacza najmniejszą powierzchnię odwzorowania (czy to obrazu z kamery, czy to najmniejszą rozróżnialną powierzchnię tabliczki graficznej).

2.2. Zakłócenia w układach akwizycji

Na precyzję jakichkolwiek pomiarów najistotniejszy wpływ ma dokładność używanych urządzeń pomiarowych, a także warunki, w jakich te pomiary są przeprowadzane.

Najważniejsze czynniki wpływające na zniekształcenie obrazów statycznych, monochromatycznych [3]:

1. Rzut perspektywiczny trójwymiarowych brył sceny na płaszczyznę światłoczułą przetwornika optoelektronicznego prowadzi do utraty informacji niezbędnej do rekonstrukcji kształtu.
2. Układ optyczny wprowadza zniekształcenia obrazu m.in. geometryczne.
3. Próbkowanie i kwantowanie sygnału wizyjnego prowadzi do utraty części informacji zawartej w rozkładzie intensywności obrazu.
4. Rozkład jasności obrazu cyfrowego jest zniekształcony w wyniku działania różnego rodzaju zakłóceń w układzie elektrycznym systemu wizyjnego (szumy, nieliniowe odwzorowanie poziomów jasności) oraz z samej zasady działania przetwornika (np. dla przetworników z akumulacją fotonów pojawia się zjawisko zwane olśnieniem).

Parametry opisujące tabliczkę graficzną (opartą na detekcji pola elektromagnetycznego) pozwalające na zorientowanie się we wprowadzanych przez to urządzenie błędach [8]:

1. Wielkość szumów wprowadzanych przez pole elektromagnetyczne - zarówno wytwarzane przez kursor^{*}, jak i zewnętrzne pola zakłócające.
2. Maksymalne oddalenie kursora od powierzchni tabliczki - tabliczka graficzna umożliwia odwzorowanie kształtów na grubych zdjęciach, różnego rodzaju płytkach itp. Wtedy kursor znajduje się w pewnej odległości ponad powierzchnią pola aktywnego tabliczki. Umieszczenie go powyżej granicy określonej przez maksymalne oddalenie kursora od powierzchni powoduje bardzo duże błędy w detekcji położenia kursora lub brak jego detekcji.
3. Rozśrodkowanie kursora - współrzędne generowane przez kursor dla tego samego punktu wskazywanego przez celownik są różne w zależności od kąta obrotu kursora wokół środka celownika na powierzchni tabliczki.
4. Powtarzalność - błąd popełniany przy wielokrotnym wskazywaniu tego samego punktu na powierzchni tabliczki.

* Kursor - urządzenie dołączane do tabliczki graficznej służące do wskazywania punktów na jego powierzchni, wyglądem i sposobem obsługi przypominające myszkę komputerową.

5. Rozdzielczość - ilość możliwych do wygenerowania współrzędnych na jednostkę długości. Dokładność tabliczki nigdy nie może być większa, niż na to pozwala maksymalna rozdzielczość.
6. Błąd przechyłu rysika* (używanego zamiast kursora) - wskazując na polu aktywnym dany punkt, w zależności od przechyłu rysika tabliczka generuje różne współrzędne. Błąd wprowadzany przez przechył może być bardzo duży, przy czym nie jest to błąd systematyczny (nie jest możliwy do skorygowania), dlatego rysik nie nadaje się jako urządzenie do wprowadzania współrzędnych punktów mających być podstawą do pomiarów.

Wszystkie wyżej opisane parametry tabliczki graficznej zawierają się zwykle w jednej wielkości podawanej przez producenta - dokładności - wyszczególnionej oddzielnie dla kursora i rysika. Błąd ten jest większy, niż wynikałoby to z podanej rozdzielczości urządzenia (np. dla tabliczki SummaSketch Plus dla kursora wynosi ± 0.625 mm przy rozdzielczości 40 linii/mm). Dla rysika jest znacznie większy niż dla kursora.

3. Metody kalibracji urządzeń akwizycji danych

3.1. Kalibracja

Aby przeprowadzone pomiary mogły być użyteczne, konieczne jest podawanie wyników w rzeczywistych (fizycznych) jednostkach miary, a nie tylko w pikselach. W tym celu musi być znana długość wycinka sceny dwuwymiarowej, który jest odwzorowywany na pojedynczy piksel, w fizycznej jednostce miary długości. Ponieważ dla analizowanych urządzeń przyjęto, że piksel jest prostokątem**, musi być wyznaczona jego szerokość i wysokość dla każdego urządzenia akwizycji.

* Rysik - drugi typ urządzenia do wskazywania punktów na tablecie graficznym, podobny do zwykłego pisaka z przyciskiem.

** Prostokątny piksel - dla kamer z matrycą CCD jest to prawdą, inne kamery (zwłaszcza starsze) mogą nie spełniać tego założenia. Większość tabliczek graficznych również spełnia to założenie (zwykle siatka sensorowa lub matryca przycisków jest kwadratowa).

3.2. Kalibracja kamery monochromatycznej

Kalibracja kamery musi być dokonywana każdorazowo po zmianie warunków akwizycji (zmiana odległości kamery od sceny), ponieważ wynik kalibracji zależy nie tylko od parametrów technicznych samej kamery, lecz także od jej ustawienia w przestrzeni.

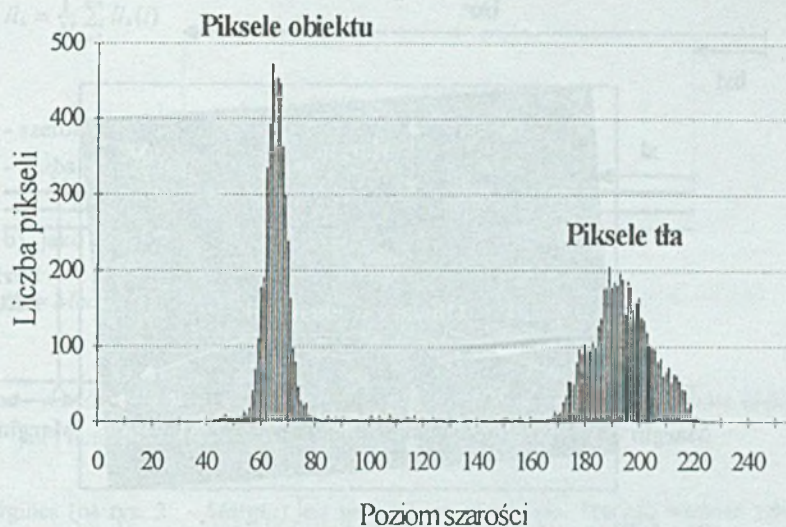
Proponowana metoda automatycznej kalibracji przewiduje użycie prostokątnego, w jednolitym kolorze, wzorca, umieszczonego na kontrastowym, również jednolitym tle. Prostokąt powinien być ustawiony swoją podstawą równoległe do podstawy obrazu uzyskiwanego z kamery. Wymiary wzorca muszą być znane, nie są wymagane inne parametry jak np. odległość wzorca od kamery. Oświetlenie sceny wzorcowej musi zapewniać, że na obrazie będzie duży kontrast pomiędzy wzorcem a tłem.

Przy pomiarze innych obiektów należy pamiętać, aby były one w tej samej odległości od kamery co wzorec i miały dobre warunki oświetlenia (światło możliwie jednolite, niezmienne, umożliwiające przeprowadzenie segmentacji obrazu cyfrowego).

Zakłada się, że na zarejestrowanym obrazie do kalibracji jest tylko wzorec i tło.

3.2.1. Etapy algorytmu automatycznej kalibracji

1. Wyznaczenie histogramu [7] obrazu ze wzorcem (rys.1) w celu:
 - a) określenia poziomu szarości niskiego i wysokiego (globalnego poziomu szarości tła i wzorca jako lokalne maksima histogramu obrazu),
 - b) doboru optymalnego progu binaryzacji - w połowie odległości pomiędzy poziomem szarości niskim a wysokim.



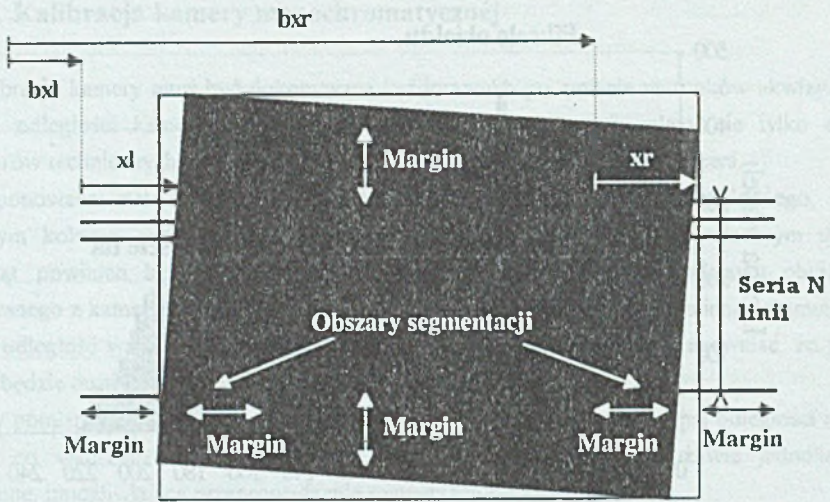
Rys. 1. Przykładowy histogram obrazu ze wzorcem kalibracji

Fig. 1. Histogram of a sample image with calibration target

2. Binaryzacja, jako metoda wstępnej segmentacji*.
3. Wyznaczenie granic prostokątnego wzorca na podstawie obrazu zbinaryzowanego. Są wyznaczone dwa prostokąty, których boki pionowe i poziome są równoległe do odpowiednich osi układu współrzędnych: prostokąt minimalny obejmujący wzorec i prostokąt maksymalny mieszczący się we wnętrzu wzorca (zakłada się, że zarejestrowany obiekt wzorcowy może mieć nieco "postrzępione" brzegi oraz może być nieco przekrzywiony). Prostokąty te zaznaczono na rys. 2.
4. Wyznaczenie szerokości wzorca w pikselach.

Idea wyznaczania szerokości jest przedstawiona na rys. 2:

* Segmentacja obrazu - wydzielenie z obrazu obszarów istotnych (obiektów) i obszarów nieistotnych (tła).



Rys. 2. Wyznaczania szerokości obiektu prostokątnego na obrazie
Fig. 2. Determining the width of a rectangular object in the image

Część linii obrazu (seria N linii - patrz rys. 2) przecinających wzorec jest wykorzystana do wyznaczenia szerokości obiektu wzorcowego. Dla każdej linii w serii jest obliczona szerokość wzorca zgodnie ze wzorem:

$$l_x(i) = (bxr + xr) - (bxl + xl)$$

gdzie:

- $l_x(i)$ - długość i-tej linii,
- bxl - współrzędna początku lewego obszaru segmentacji (obszary segmentacji, będące odcinkami poziomymi obrazu cyfrowego, zaznaczono na rys. 2),
- bxr - współrzędna początku prawego obszaru segmentacji,
- xl - pozycja konturu w lewym obszarze segmentacji względem bxl ,
- xr - pozycja konturu w prawym obszarze segmentacji względem bxr .

Globalną szerokość obiektu można wyznaczyć na dwa sposoby:

- a) jako średnią arytmetyczną serii długości linii

$$l_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_x(i)$$

gdzie:

l_x - szerokość obiektu,

N - liczba linii w serii,

b) jako medianę serii długości linii

$$l_x = \text{Mediana}(l_x(i)), \text{ dla } i = 1..N$$

gdzie:

Mediana - wartość graniczna, wyznaczająca zarówno taką samą liczbę elementów większych, jak i mniejszych od niej samej w zbiorze, do którego należy.

Margin (na rys. 2 - *Margin*) jest parametrem algorytmu, którego wartość zależy od jakości obrazu do kalibracji: maksymalnego występującego w danym zastosowaniu przekrzywienia wzorca, zakłóceń występujących na obrazie i jest ustawiany przez opiekuna systemu automatycznej kalibracji (dla konkretnego zastosowania). Obszary segmentacji są wyróżnione dlatego, że określenie współrzędnej przejścia obiekt-tło może być dokonane przy użyciu różnych metod segmentacji (binaryzacja, segmentacja subpikselowa* i in.), m.in. takich, które jako obrazu źródłowego wymagają pojedynczej linii obrazu, o której wiadomo, że zawiera tylko jedną krawędź wzorcowo-tło.

5. Wyznaczanie wysokości obiektu w pikselach (czyli parametru l_y) - realizowane analogicznie jak wyznaczanie szerokości.

Para l_x i l_y tworzy wektor określający parametry wzorca do kalibracji:

$$\vec{l} = (l_x, l_y)$$

6. Obliczenie szerokości i wysokości pojedynczego piksela na podstawie wyznaczonych rozmiarów obiektu w pikselach i rzeczywistych rozmiarów wzorca wprowadzonych przez użytkownika w dowolnej jednostce długości.

* Segmentacja subpikselowa - [1] segmentacja umożliwiająca wyznaczenie współrzędnych obrazowych granicy pomiędzy dwoma różnymi obszarami na obrazie (np. pomiędzy obszarem tła a obszarem obiektu) z dokładnością lepszą niż wynikająca ze zdolności rozdzielczej przetwornika optoelektronicznego, czyli do ułamka piksela.

$$\bar{p} = K(\bar{l}, \bar{m}), \quad p_i = \frac{lm_i}{l_i}$$

gdzie:

- \bar{m} - wektor opisujący szerokość i wysokość wzorca w rzeczywistych jednostkach miary długości,
- \bar{p} - wektor współczynników kalibrujących (rozmiary piksela w jednostkach miary długości),
- $K()$ - funkcja kalibrująca, której znaczenie opisano wyżej.

3.3. Kalibracja tabliczki graficznej

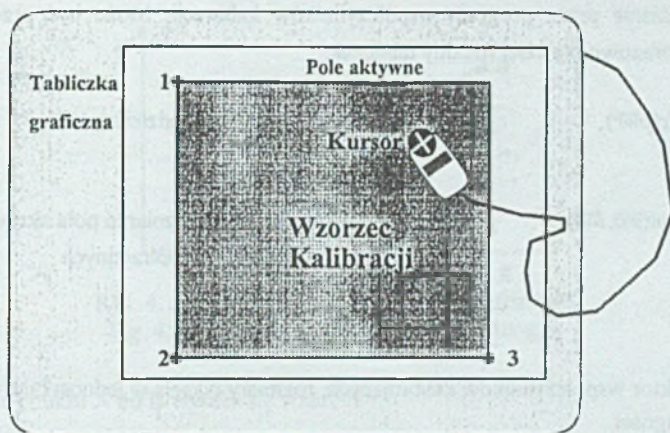
Tabliczka graficzna w przeciwieństwie do systemów z kamerą wymaga jednokrotnej kalibracji - w momencie instalacji w danym systemie. Kalibracja tabliczki może być przeprowadzona dwiema metodami:

1. Na podstawie wzorca - metoda uniwersalna dla wszystkich tabliczek, lecz wymaga wzorca.
2. Na podstawie danych technicznych tabliczki - szerokości i wysokości pola aktywnego* i maksymalnych generowanych współrzędnych lub rozdzielczości urządzenia.

3.3.1. Algorytm przeprowadzania kalibracji dla metody pierwszej

1. Umieszczenie wzorca na tabliczce - podstawa wzorca musi być równoległa do podstawy pola aktywnego tabliczki graficznej (rys. 3).

* Pole aktywne tabliczki graficznej - część powierzchni urządzenia reagująca na położenie kursora dołączonego do tabliczki.



Rys. 3. Tabliczka graficzna ze wzorcem kalibracji

Fig. 3. Tablet digitizer with calibration target

- Wybranie (wskazanie) kursorem punktów charakterystycznych wzorca zgodnie z zaleceniami odpowiedniego programu kalibrującego. Punkty charakterystyczne zaznaczono na rys. 3 i ponumerowano od 1 do 3. Na podstawie odczytanych współrzędnych punktów określone są szerokość i wysokość wzorca w pikselach:

$$l_x = |pkt3_x - pkt2_x| \quad \text{oraz} \quad l_y = |pkt1_y - pkt2_y|$$

$$\text{stąd: } \bar{l} = (l_x, l_y)$$

gdzie:

$pkt1_y, pkt2_x, pkt2_y, pkt3_x$ - są współrzędnymi punktów charakterystycznych wzorca kalibracji tabliczki (zaznaczone na rys. 3).

- Obliczenie współczynników kalibracji. Obliczenie to jest wykonywane jednokrotnie w momencie instalacji urządzenia w systemie i jest dokonywane na podstawie funkcji kalibrującej K jak dla kamery.

3.3.2. Algorytm kalibracji dla metody drugiej (opartej na danych technicznych)

- Wprowadzenie do programu kalibrującego danych o wysokości i szerokości pola aktywnego tabliczki graficznej i maksymalnych generowanych współrzędnych lub rozdzielczości tabliczki.

2. Obliczenie przez program współczynników kalibracji. Może być przeprowadzone jednorazowo dla całej rodziny tabliczek.

$$\bar{p} = \text{Tr}(\bar{pwr}), \quad p_i = \frac{1}{\bar{pwr}_i} \quad - \text{ dla danych o rozdzielczości}$$

$$\bar{p} = \text{Tm}(\bar{wa}, \bar{mc}), \quad p_i = \frac{wc_i}{mc_i} \quad - \text{ dla danych o rozmiarze pola aktywnego i maksymalnych współrzędnych}$$

gdzie:

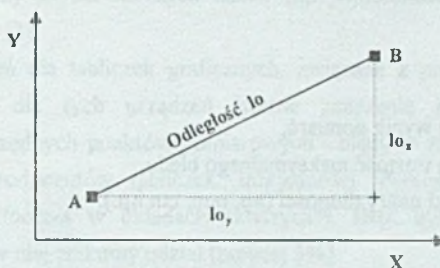
- \bar{p} - wektor współczynników kalibrujących, rozmiary piksela w jednostkach miary długości,
 \bar{pwr} - wektor opisujący rozdzielczość (poziomą i pionową) w liczbach pikseli (linii) na jednostkę długości,
 \bar{wa} - wektor opisujący szerokość i wysokość pola roboczego w jednostkach miary długości,
 \bar{mc} - wektor zawierający maksymalne generowane współrzędne,
 $\text{Tr}()$ - funkcja kalibrująca tabliczkę na podstawie danych o rozdzielczości,
 $\text{Tm}()$ - funkcja kalibrująca tabliczkę na podstawie danych o rozmiarach pola aktywnego i maksymalnych współrzędnych.

UWAGA: Ten sposób kalibracji może być mniej dokładny (ze względu na indywidualne cechy poszczególnych urządzeń). Inną przyczyną błędnego obliczenia współczynników kalibracji może być nieadekwatność aktualnego trybu pracy urządzenia względem podanych danych technicznych (producent podaje rozdzielczość maksymalną, a tabliczka pracuje zwykle w trybie o mniejszej rozdzielczości lub tabliczka należy do klasy urządzeń o nominalnych wymiarach pola aktywnego 12 x 12 cali, lecz w rzeczywistości to pole ma nieco inne wymiary, itd.).

4. Pomiary odległości

4.1. Pomiary odległości na płaszczyźnie

Mając dane współrzędne dwóch punktów (współrzędne obrazowe lub wygenerowane przez tabliczkę graficzną itd.) można obliczyć odległość euklidesową tych punktów w przestrzeni odwzorowania.



Rys. 4. Pomiar odległości na obrazach cyfrowych

Fig. 4. Distance measurement in digital images

Odległość punktu A od B wyraża się wzorem:

$$l_0 = \sqrt{l_{0x}^2 + l_{0y}^2}$$

Z punktu widzenia pomiarów obiektów rzeczywistych jest ona mało przydatna. Bardziej przydatna jest odległość w przestrzeni odwzorowywanej:

$$rl = \sqrt{(p_x l_{0x})^2 + (p_y l_{0y})^2}$$

gdzie:

rl - odległość rzeczywista w jednostkach miary odległości,

p_x, p_y - współczynniki kalibrujące w kierunkach osi współrzędnych x i y w jednostkach miary długości. Są to składowe obliczonego wcześniej wektora \vec{p} ,

l_{0x}, l_{0y} - odległości punktów na obrazie (rys. 4) w kierunkach osi współrzędnych.

Współrzędne punktów, pomiędzy którymi obliczana jest odległość, są współrzędnymi pikseli obrazowych lub współrzędnymi generowanymi przez tabliczkę graficzną. Pojedynczy piksel odwzorowuje pewien wycinek rzeczywistości (fragment powierzchni), a więc pomiar odległości obarczony jest pewnym błędem - błędem dyskretyzacji. Błąd ten występuje w każdym cyfrowym urządzeniu pomiarowym, również tabliczce graficznej.

Zależności matematyczne uwzględniające błędy zawarte są w następnym podrozdziale.

Odległości rzeczywiste są podawane w jednostkach miary długości, które również powinny zostać uwzględnione w zapisie wyniku końcowego. Tak więc końcowy zapis pomiaru będzie się przedstawiał wzorem:

$$rl \pm \Delta rl \quad [JMD]$$

gdzie:

- rl - liczba opisująca wynik pomiaru,
 Δrl - liczba opisująca wartość maksymalnego błędu,
 JMD - symbol jednostki miary długości (np. mm, cm itp.).

4.2. Błędy pomiarowe

4.2.1. Błąd pomiarów długości odcinków na podstawie współrzędnych punktów pomiarowych

Przez błąd pomiarów długości odcinków na obrazie (pomiędzy pewnymi punktami opisanymi za pomocą współrzędnych) rozumie się błąd określenia długości wyrażonej w pikselach. Na tak określony błąd składają się: błąd dyskretyzacji, błąd zniekształcenia geometrycznego obrazu i inne błędy, które są pomijalnie małe.

Maksymalny błąd pomiarowy:

$$\overline{BP}_{MAX} = 2(\overline{BD}_{MAX} + \overline{BW}) + \overline{BZ} + \overline{B}$$

gdzie:

- \overline{BP}_{MAX} - maksymalny błąd pomiaru długości obiektu (wektor, którego składowymi są błędy popelniane w poszczególnych kierunkach),
 \overline{BD}_{MAX} - maksymalny błąd dyskretyzacji,
 \overline{BW} - inne błędy związane z określeniem współrzędnych pojedynczego punktu pomiarowego,
 \overline{BZ} - błąd wynikający ze zniekształceń geometrycznych odwzorowania,
 \overline{B} - suma błędów innych.

Błąd wynikający ze zniekształceń odwzorowania (\overline{BZ}) jest dla każdego urządzenia inny.

Dla kamer dobrej jakości błąd zniekształceń jest zanedbywalny, chyba że do wyznaczenia współrzędnych punktów pomiarowych użyto metod segmentacji subpikslowej - należy wtedy zachować ograniczenie, aby mierzony obiekt znajdował się w centralnej części powierzchni obrazu oraz jego szerokość i wysokość nie przekraczały 30% szerokości i wysokości obrazu.

Błąd zniekształceń przy użyciu starszych kamer (np. widikonowych) ma duży wpływ na dokładność pomiarów [3].

Błędy zniekształceń dla tabliczek graficznych, związane z precyzją ich wykonania, są znikome. Natomiast dla tych urządzeń istotne znaczenie mają błędy związane z wyznaczaniem współrzędnych punktów pomiarowych - błędy te zawierają się w parametrze podawanym przez producentów tabliczek: dokładności. Parametr ten został wcześniej opisany (rozdz. "Zakłócenia w układach akwizycji"). Błąd dyskretyzacji jest składową dokładności, lecz ma w niej znikomą udział (poniżej 5%).

4.2.2. Błąd kalibracji

Na błąd kalibracji przy użyciu wzorca mają wpływ błędy pomiaru szerokości i wysokości wzorca (jako błąd pomiarów długości odcinków na podstawie współrzędnych) oraz błąd wnoszony przez wzorec (dokładność jego wykonania):

$$p_i \pm \Delta p_i = \frac{l m_i \pm \Delta l m_i}{l l_i \pm \Delta l l_i}$$

gdzie:

- p_i - składowa długości piksela w kierunku i -tym (w jednostce miary długości),
- Δp_i - składowa błędu bezwzględnego długości piksela w kierunku i -tym (w jednostce miary długości),
- $l m_i$ - składowa długości wzorca rzeczywistego w kierunku i -tym (w jednostce miary długości),
- $\Delta l m_i$ - składowa błędu bezwzględnego wzorca w kierunku i -tym (w jednostce miary długości),
- $l l_i$ - składowa długości wzorca na obrazie w kierunku i -tym (w pikselach),
- $\Delta l l_i$ - składowa błędu bezwzględnego pomiaru wzorca na obrazie w kierunku i -tym (w pikselach).

Problem wyznaczenia błędu szerokości i wysokości piksela sprowadza się do zastosowania oszacowania błędu wprowadzanego przez operację arytmetyczną dzielenia (jest to błąd bezwzględny):

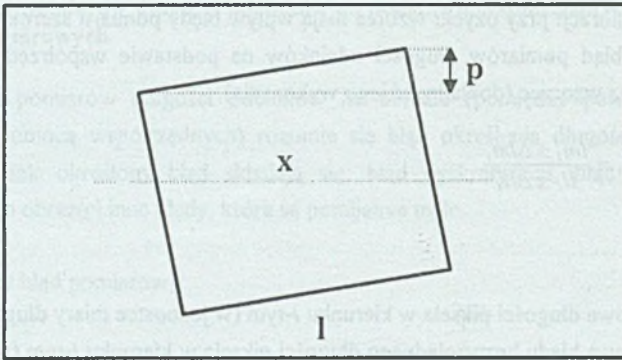
$$\Delta p_i = \left| \frac{1}{l l_i} \right| \Delta l m_i + (|l m_i| + \Delta l m_i) \frac{\Delta l l_i}{|l l_i| (|l l_i| - \Delta l l_i)}$$

Błąd względny dla rozmiarów pikseli wynosi w przybliżeniu:

$$\delta p_i \cong \delta l m_i + \delta l l_i,$$

gdzie:

- δp_i - składowa błędów względnego wektora rozmiarów pikseli w kierunku i -tym,
- $\delta l m_i$ - składowa błędów względnego wzorca rzeczywistego w kierunku i -tym,
- $\delta l l_i$ - składowa błędów względnego wzorca mierzonego na obrazie w kierunku i -tym.



Rys. 5. Ilustracja obliczeń błędów przechyłu wzorca na obrazie
Fig. 5. Estimating of the error resulting from pattern image skew

Oprócz wyżej opisanych błędów na dokładność kalibracji może mieć wpływ przechylenie wzorca na obrazie (tzn. nierównoległość podstawy wzorca względem podstawy obrazu):

$$\Delta x = |l - x| \cong \frac{p^2}{2x}$$

$$\text{oraz } \delta x = \frac{\Delta x}{l} \cong \frac{p^2}{2x^2}$$

gdzie:

Δx - błąd bezwzględny wynikający z przechyłu (w pikselach),

δx - błąd względny wynikający z przechyłu,

l - długość obiektu nie przechylonego (w pikselach),

p - przechył - interpretacja zgodnie z rys. 5 (w pikselach),

x - długość obiektu zmierzona (w pikselach).

Dla niewielkiego przechyłu obiektu wzorcowego, tzn. jeśli $x \gg p$ (dla współrzędnych punktów pomiarowych wyznaczanych z dokładnością pikselową: jeśli p stanowi co najwyżej 5% długości x), błąd ten jest pomijalnie mały. Doświadczenie wykazuje, że człowiek stosujący się do zaleceń użycia wzorca nie popełnia błędu przekrzywienia (δx) większego niż 1.25% (tzn. p nie przekracza 5% długości x).

Dla kalibracji na podstawie danych producenta (dla tabliczek graficznych) oszacowanie błędu jest zależne od cech indywidualnych danego urządzenia. Dane podawane przez producenta o rozdzielczości tabliczki, rozmiarach pola aktywnego i maksymalnych generowanych współrzędnych nie są wystarczające do wyznaczenia błędu kalibracji (nie podaje się dokładności powyższych danych) - należy go zweryfikować doświadczalnie.

4.2.3. Błąd pomiarów długości odcinków rzeczywistych

Długość mierzonego odcinka w jednostkach długości wynosi:

$$rl_i \pm \Delta rl_i = (p_i \pm \Delta p_i)(l_{o_i} \pm \Delta l_{o_i})$$

gdzie:

rl_i - składowa długości mierzonego obiektu w kierunku i -tym (w jednostkach długości),

Δrl_i - składowa błędu bezwzględnego mierzonego obiektu w kierunku i -tym,

p_i - składowa długości piksela w kierunku i -tym (na podstawie kalibracji - w jednostkach długości),

Δp_i - składowa błędu bezwzględnego długości piksela w kierunku i -tym,

l_{o_i} - składowa długości mierzonego obiektu na obrazie w kierunku i -tym (w pikselach),

Δl_{o_i} - składowa błędu bezwzględnego mierzonego obiektu na obrazie w kierunku i -tym.

Błąd pomiaru bezwzględny:

$$\Delta r l_i = |l o_i| \Delta p_i + |p_i| \Delta l o_i + \Delta p_i \Delta l o_i$$

Względny błąd pomiaru:

$$\delta r l_i = \delta p_i + \delta l o_i + \delta p_i \delta l o_i$$

gdzie:

$\delta r l_i$ - składowa błędu względnego mierzonego obiektu w kierunku i -tym,

δp_i - składowa błędu względnego długości piksela w kierunku i -tym,

$\delta l o_i$ - składowa błędu względnego mierzonego obiektu na obrazie w kierunku i -tym.

Ostatecznie błędy pomiarowe dane są wzorami:

$$\Delta r l = \sqrt{\Delta r l_x^2 + \Delta r l_y^2} \quad - \text{ błąd bezwzględny pomiaru odległości,}$$

$$\delta r l = \frac{\sqrt{(r l_x \delta r l_x)^2 + (r l_y \delta r l_y)^2}}{\sqrt{r l_x^2 + r l_y^2}} = \frac{\sqrt{(r l_x \delta r l_x)^2 + (r l_y \delta r l_y)^2}}{r l} \quad - \text{ błąd względny.}$$

5. Podsumowanie

1. Z przedstawionego opracowania błędów kalibracji i pomiarowych można wywnioskować, że zależą tylko od parametrów urządzenia akwizycji i dokładności wykonania wzorca (dla kalibracji z użyciem wzorca). Dla kamer jest tak zawsze - poprawienie jakości kamery i/lub wykonania wzorca wiąże się z poprawieniem dokładności pomiarów. Natomiast dla tabliczek graficznych jest to prawdą do pewnej granicy - granicy precyzji manipulacji kursorem lub rysikiem przez człowieka. Dokładność podawana przez producentów tabliczek w pewnym stopniu uwzględnia ten czynnik (w postaci parametru powtarzalności).
2. Opisywane metody i wzory mogą być wykorzystane dla innych urządzeń rastrowych, np. dla skanera stacjonarnego.
3. Opracowane algorytmy kalibracji oraz wzory obliczania błędów pomiarowych zostaną zastosowane w systemie analizy ortodontycznej. Będzie to system do wspomagania

diagnostyki zniekształceń części twarzowej czaszki (metody diagnostyki ortodontycznej opisane są m.in. w [5], a także [4]).

LITERATURA

- [1] Duvieubourg L.: Analyse de différentes méthodes de segmentation subpixel application a l'extensométrie. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej - Informatyka z. 21, nr 1191, Gliwice 1992.
- [2] Dziambor K.: Metoda obliczania parametrów geometrycznych figur w systemach wizyjnych. Podstawy Sterowania, vol. 17, nr 3-4, 1987, pp. 149-168.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją A. Materki: Elementy cyfrowego przetwarzania i analizy obrazów. PWN, Warszawa-Łódź 1991.
- [4] Michalik A., Sadłowski R.: Komputerowa metoda pomiarów teleradiogramów bocznych głowy dzieci z rozszczepami podniebienia pierwotnego i wtórnego. Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej pt. "Współczesna diagnostyka radiologiczna części twarzowej czaszki", Opole 27-28 wrzesień 1991.
- [5] Rakosi T.: An Atlas and Manual of Cephalometric Radiography. Wolfe Medical Publications Ltd. 1982.
- [6] Rusin M.: Telewizja. Wizyjne przetworniki optoelektroniczne. WKŁ, Warszawa 1990.
- [7] Skarbek W.: Metody reprezentacji obrazów cyfrowych. Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1993.
- [8] Instrukcja obsługi tabliczki graficznej: SummaSketch Professional - User's Guide, Summagraphics Corporation 1986.
- [9] Walczyk J.: Podstawy systemów telewizji użytkowej. WKŁ, Warszawa 1982.

Recenzent: Dr inż. Henryk Małysiak

Wpłynęło do Redakcji 10 lipca 1996 r.

Abstract

The paper presents two kinds of raster devices used in measurement systems: monochrome cameras and tablet digitizers. These devices can be used to measure various geometrical features such as: heigh and width of an object, area, perimeter and others. Particular attention is devoted to distortions introduced by aquisition devices.

In chapter 3 a calibration method is proposed for measurement systems with cameras and tablet digitizers. The method relies on a rectangular, uniform calibration target (Fig. 2). This chapter also presents a calibration method for tablet digitizers based on manufacturers' data (Fig. 3).

Chapter 4 explains how calibration data can be used for distance measurement in the 2D real scene based on image-plane coordinates of points belonging to the scene. Error assessment methodology is also discussed in detail.

The paper concludes by describing the factors limiting measurement precision using cameras and tablet digitizers.