

WYZNACZANIE PARAMETRÓW DYSTORSJI KAMERY NA PODSTAWIE ZDJĘĆ OBIEKTÓW NATURALNYCH I KOREKCJA ZDJĘĆ

***Streszczenie.** W referacie omówiono sposoby wyznaczenia parametrów dystorsji zdjęć wykonanych niedrogimi kamerami cyfrowymi. Do wyznaczenia tych parametrów mogą zostać wykorzystane pojedyncze zdjęcia, obiektów dla których nie jest znana informacji o rzeczywistych współrzędnych 3D. Omówiono metody wykorzystujące zniekształcenie odwzorowania obiektów liniowych. Przedstawiono kilka metod znajdowania parametrów dystorsji. W dalszej części omówione zostały problemy związane z korekcją zdjęć (usuwaniami zniekształceń wywołanych dystorsją).*

Wprowadzenie

Do opisu modelu matematycznego kamery stosowany jest przeważnie równania opisujące rzut środkowy. Ta transformacja z układu współrzędnych 3D do 2D w przypadku zastosowania współrzędnych jednorodnych staje się układem liniowym.

Rzeczywiste kamery odbiegają od modelu liniowego, zwłaszcza dotyczy to niedrogich kamer (aparatów) cyfrowych ze zmienną ogniskową. W tym przypadku okazuje się, że główną przyczyną błędów są przede wszystkim zniekształcenia zwane dystorsją radialną. Konieczna jest więc kompensacja dystorsji poprzez wprowadzenie nieliniowych poprawek do wyników pomiarów w płaszczyźnie tłowej (2D).

Istnieje wiele metod kalibracji kamer pozwalających na wyznaczenie parametrów orientacji wewnętrznej, w tym dystorsji. Większość z nich wykorzystuje wzorce kalibracyjne lub obiekty (punkty osnowy) o znanych współrzędnych 3D [Tsai,1987]. W praktyce zdarza się konieczność wykorzystania już wykonanych zdjęć nie zawierających punktów o znanych współrzędnych. Znane są metody [Stein,1997] samokalibracji oparte na wykorzystaniu kilku zdjęć, w których następuje jednoczesne wyznaczenie parametrów orientacji wewnętrznej, dystorsji, orientacji wzajemnej kamer, jednak ze względu na korelacje parametrów nie jest możliwe ich dokładne wyznaczenie.

Ze względu na coraz większe zainteresowanie możliwością wykorzystania zdjęć cyfrowych i koniecznością ich korekcji niezbędne jest wyznaczenie potrzebnych parametrów. W [Callldwell,2004] pokazano aplikację programu PhotoShop, służącą do korekcji zdjęć, która jednak wymaga "zgadywania" wartości parametrów. Jako ciekawostkę należy dodać, że z treści tej informacji wynika, że zastosowanie różnych parametrów dla każdego z kanałów koloru powoduje zniknięcie kolorowych obwódok na krawędziach szczegółów obrazu co sugeruje dużą aberrację chromatyczną obiektywów.

W referacie przedstawiono kilka metod wyznaczenia parametrów dystorsji kamery na podstawie pojedynczego zdjęcia bez dodatkowej informacji oraz wykorzystania tych wyników do korekcji zdjęć.

Obiekt testowy

Do celu testowania praktycznych rozwiązań wykorzystano zdjęcia posadzki Dużej Auli w Gmachu Głównym Politechniki Warszawskiej. Jak widać na rysunku zawiera ona dużą liczbę linii prostych prostopadłych do siebie. Dla informacji należy dodać że rozmiar białego kwadratu wynosi 2 na 2 m, szerokość ciemnej linii rozdzielającej wynosi 20 cm. Wykorzystywane zdjęcia wykonano aparatem cyfrowym NIKON 990 Coolpix, przeważnie w rozdzielczości 1712 x 1368 pixeli (niektóre z demonstracji przedstawionych w tekście wykonano po przeskalowaniu do rozmiaru 640 x 511). Zdjęcia przekonwertowano do formatu z 256 odcieniami szarości.



Rys.1 Obraz testowy (widoczne zniekształcenia obrazu w dolnej części)

Opis matematyczny dystorsji

Do opisu modelu matematycznego kamery stosowany jest przeważnie równania opisujące rzut środkowy.

$$\begin{aligned}x &= c_k \frac{X}{Y} \\ y &= c_k \frac{Y}{Z}\end{aligned}\tag{1}$$

Dystorsja jest uwzględniana jako poprawki do równań rzutu środkowego. W dalszej części tekstu przyjęto następujące oznaczenia:

- x_0, y_0 – współrzędne punktu najlepszej symetrii
- x_d, y_d - współrzędne tłowe odczytane ze zdjęcia

$$r_d - \text{promień wodzący } r_d = \sqrt{(x_d - x_0)^2 + (y_d - y_0)^2}$$

x_u, y_u – współrzędne po skorygowaniu (usunięciu dystorsji)

$$r_u - \text{promień wodzący } r_u = \sqrt{(x_u - x_0)^2 + (y_u - y_0)^2}$$

Istnieje szereg opisów matematycznych dystorsji, najbardziej popularny przedstawiono poniżej:

$$\begin{aligned} x_u &= x_0 + (x_d - x_0)(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) + \\ &+ p_1 [(x_d - x_0) + r_d^2] + 2p_2 (x_d - x_0)(y_d - y_0) \\ y_u &= y_0 + (y_d - y_0)(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) + \\ &+ p_2 [(y_d - y_0) + r_d^2] + 2p_1 (x_d - x_0)(y_d - y_0) \end{aligned} \quad (2)$$

Parametry k_1, k_2, \dots określają dystorsję radialną, parametry p_1 i p_2 odpowiadają za tzw. dystorsję tangencjalną, która w tym opracowaniu zostaje pominięta, tak więc otrzymujemy nieskończone ciągi:

$$x_u = x_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) \quad (3)$$

$$y_u = y_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots)$$

lub inaczej

$$r_u = r_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + \dots) \quad (3a)$$

W praktyce uwzględnienie tylko pierwszego współczynnika koryguje 90 % zniekształceń dystorsji. Tak więc przy założeniu, że początek układu jest umieszczony w punkcie najlepszej symetrii, wzory te są przeważnie zapisywane w postaci:

$$x_u = x_d + \Delta x \quad (4a)$$

$$y_u = y_d + \Delta y$$

gdzie

$$\Delta x = x_d(k_1 r_d^2) \quad (4b)$$

$$\Delta y = y_d(k_1 r_d^2)$$

Uproszczone metody wyznaczania i korekcji dystorsji

Obiektywy (zwłaszcza ze zmienną ogniskową) stosowane w niedrogich aparatach cyfrowych charakteryzują się dużymi zniekształceniami wywołanymi dystorsją radialną. Potrafi ono dochodzić do 100 pikseli przy przekątnej obrazu 2000 pikseli. Często istnieje potrzeba wykorzystania takich zdjęć nie do celu pomiarów lecz dokumentacyjnych, tworzenia modeli 3D i pokrywania ich teksturą. Oko człowieka łatwo wykrywa takie zniekształcenia. W celu umożliwienia szybkiego "poprawienia" takich zdjęć zostały opracowane programy pozwalające na wizualne "korygowanie" zdjęć. Ze względu na trudność sterowania kilkoma wartościami programy pozwalają

na zmianę tylko parametru k_1 . Po zdefiniowaniu pomocniczego odcinka zadaniem operatora jest przesunięcie suwaka tak aby odcinek ten pokrył się z prostym (w rzeczywistości) fragmentem obiektu przedstawionego na zdjęciu. Program może pracować w dwu trybach: korekcji obrazu lub korekcji zdjęcia. Dla ułatwienia istnieje możliwość filtracji wyświetlanego obrazu (także zastosowanie operatora Canny – wykrywającego krawędzie).



Rys. 2. Dopasowanie linii sterowane przez operatora.

Metody zautomatyzowane - wykrywanie i korekcja obiektów liniowych

Podstawowym założeniem metody jest stwierdzenie, że w matematycznym rzucie środkowym (przy braku dystorsji) rzutem odcinka prostej jest także odcinek (pomijając szczególny przypadek punktu). Obecność dystorsji radialnej powoduje odkształcenie obrazów prostych i zastąpienie ich liniami krzywymi (zniekształceniu nie ulegną jedynie odcinki, których obrazy przechodzą przez punkt główny zdjęcia). Zadanie można sformułować więc następująco:

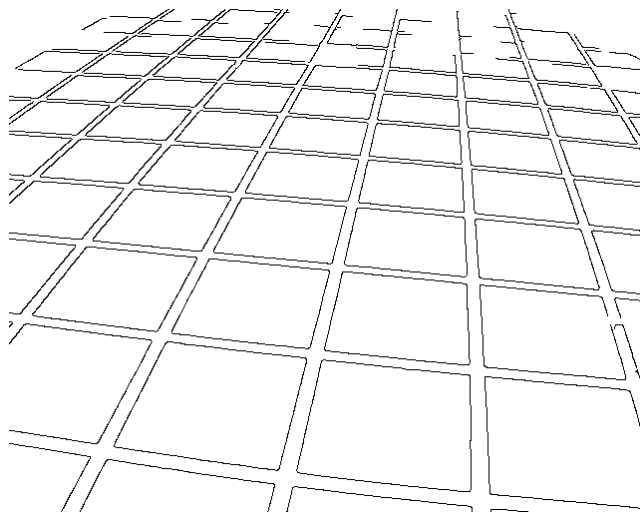
- znajdź na zdjęciu krawędzie obiektów, które w rzeczywistości są odcinkami linii prostych w przestrzeni 3D
- wyznacz parametry k_1, \dots , tak aby punkty po przemieszczeniu zgodnie z równaniem (1) znalazły się na linii prostej

Wykrywanie krawędzi – operator Canny

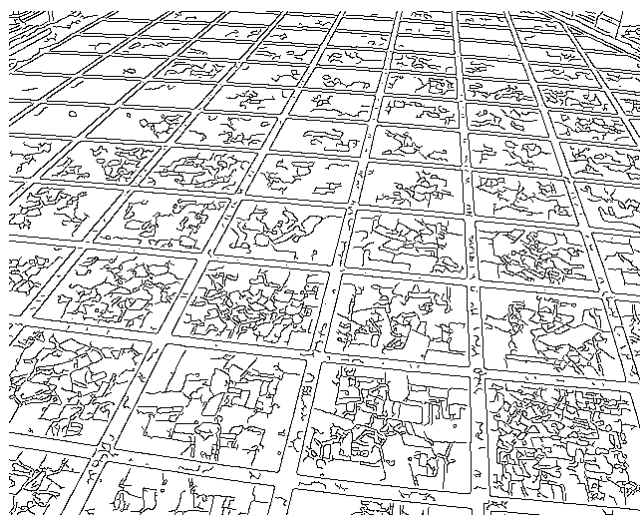
Istnieje wiele metod wyszukiwania krawędzi w obrazie cyfrowym. Przeważnie opierają się one na wyznaczeniu gradientów jasności obrazu. Jedną z metod (zastosowaną) jest wykorzystanie tzw. operatora Canny [Canny, 1986; Heath, 1998]. W skrócie działanie jego jest następujące:

- wygładzanie obrazu: wykonywana jest filtracja obrazu przy pomocy operatora Gaussa, powodując uśrednienie (usunięcie drobnych zakłóceń).
- wyznaczanie gradientów: obliczane są pochodne w obu osiach i wartość maksimum gradientu
- usunięcie maksimów lokalnych: odrzucane są maksima gradientu leżące w pobliżu innych wartości maksymalnych, leżące na liniach prostopadłych do bieżącej krawędzi,
- śledzenie krawędzi: wyznaczany jest histogram rozkładu maksimów, wyznaczone są progi górny i dolny dla histerezy śledzenia krawędzi: punkty o gradiencie większym niż górny próg mogą być początkami krawędzi, punkty o gradiencie pomiędzy górnym a dolnym progiem mogą

zostać uznane za fragment krawędzi jeśli sąsiadują z początkami krawędzi.



Rys.3. Efekty działania operatora dla prawidłowo dobranych parametrów

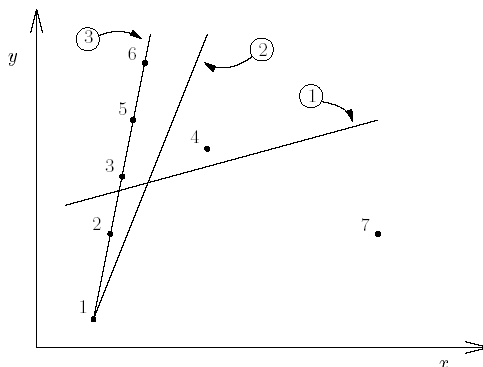


Rys.4. Przykład błędnie dobranych parametrów dla operatora Canny

Aproksymacja odcinkami (algorytm RANSAC)

Każdy z zaciemnionych punktów na rysunku jest potencjalnym kandydatem do znalezienia się na odcinku. Konieczne jest wybranie punktów należących do jednego odcinka (w tym wypadku boku kwadratu). Widoczne jest, że istnieje wiele punktów nie należących do odcinka, które powinny zostać odrzucone jako błędy grube. Praktyka wykazała, że klasyczne metody geodezji polegające na uwzględnieniu wszystkich punktów w procesie wyrównania nie pozwalają na

eliminacje błędów grubych. Rozważmy przykład poszukiwania prostej przechodzącej przez (aproxymującej) układ 7 punktów. Widoczne jest, że są tam dwa błędy grube, jednak klasyczna metoda wyrównania (linia przerywana) nie potrafi ich odnaleźć. Linia oznaczona 1 dotyczy algorytmu wyrównania uwzględniającego wszystkie punkty, linia 2 została wyznaczona po odrzuceniu błędnego punktu 7. Widać, że algorytm nie pozwoli na odrzucenie punktu 4 (także błędu grubego), ponieważ leży on bliżej prostej niż punkt 6.



Rys.4. Ilustracja efektów działania algorytmów wyrównania i RANSAC (patrz opis w tekście)

Dla takich zagadnień został opracowany algorytm zwany pod nazwą RANSAC (Random Sample Consensus), którego schemat jest następujący:

- wybieramy przypadkową parę punktów,
- wyznaczamy prostą przechodzącą przez te punkty,
- liczymy punkty znajdujące się w pobliżu wyznaczonej prostej (w ramach określonej tolerancji),
- powtarzamy próby aż do znalezienia największej liczby punktów pasującej do znalezionej prostej.

Algorytm wykorzystuje analizę statystyczną i nie wymaga (w ogólnym przypadku) "wypróbowania" wszystkich możliwości.

Łączenie odcinków

W wyniku poprzedniego etapu otrzymamy szereg krótkich odcinków, które powinny być połączone w dłuższe linie, tak aby móc efektywnie wyznaczyć współczynniki dystorsji. Konieczne jest jednocześnie rozdzielenie linii nie będących fragmentami tej samej prostej.

Wyznaczenie współczynników dystorsji

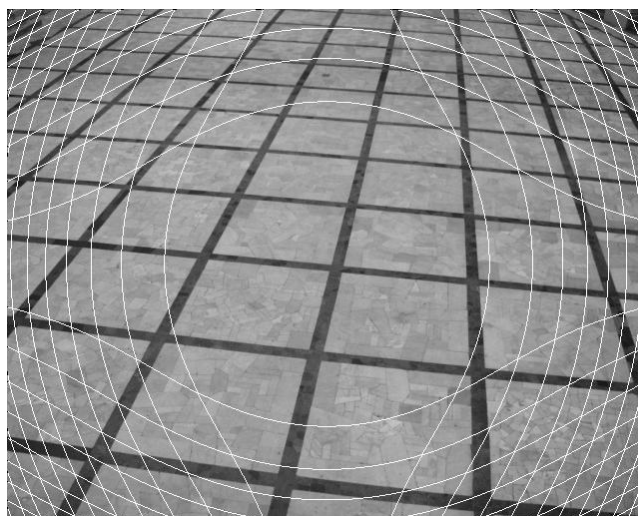
Wyznaczenie parametrów dystorsji sprowadza się do minimalizacji sumy odchyłek punktów krawędziowych od linii prostej: Parametry funkcji minimalizacyjnej są:

- współczynniki dystorsji: k_1, k_3, \dots (wzory 2,3,4)
- współczynniki równania prostej (lub prostych, jeśli wykorzystano więcej niż jedną) $Ax + By + 1 = 0$

Minimalizację wykonywano standardową metodą Levenberga-Marquarta.

Korekcja obrazu

Wyznaczone parametry można wykorzystać do korekcji zarejestrowanego obrazu. Bezpośrednie wykorzystanie wzorów (2,3,4) nie pozwala na uzyskanie poprawnego efektu, ponieważ opisują one transformację pikseli ze zdjęcia zniekształconego na poprawione. Z uwagi na całkowitoliczbowe (skwantowane) wartości współrzędnych w obrazie wynikowym mogą pojawiać się miejsca, nie mające swoich odpowiedników w obrazie źródłowym, widoczne na rys. 5.



Rys. 5. Niezdefiniowane punkty w skorygowanym obrazie

Uniknięcie tego efektu wymaga interpolacji obrazu w "brakujących" punktach lub innej interpretacji równań (3). Ich postać można zapisać następująco:

$$r_u = f(r_d)$$

Dla prawidłowego przekształcenia konieczne jest znalezienie funkcji odwrotnej:

$$r_d = g(r_u)$$

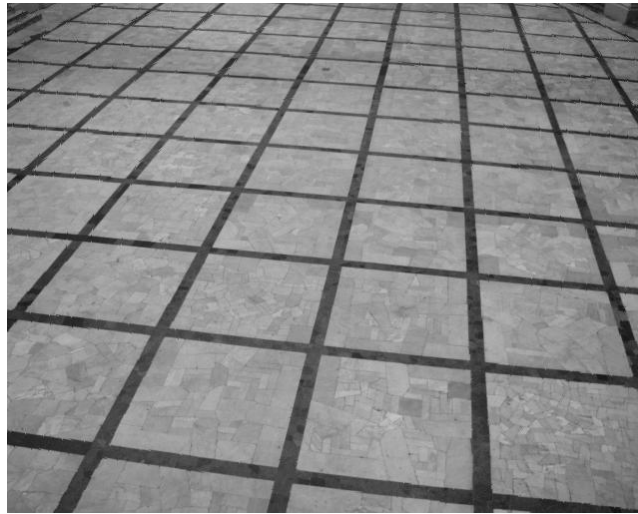
Funkcja (3) jest wielomianem, który potrafimy rozwiązać jedynie w przypadku, gdy tylko $k_1 \neq 0$, $k_2, k_3, \dots = 0$. Wtedy po podstawieniu Viet'a:

$$r_d = t - \frac{1}{3k_1 t} \quad (7)$$

możemy uzyskać rozwiązanie:

$$t = \sqrt[3]{\frac{r_u}{2k_1} + \sqrt{\frac{r_u^2}{4k_1^2} + \frac{1}{27k_1^3}}} \quad (8)$$

co pozwala na określenie, jakiemu punktowi obrazu źródłowego odpowiada punkt o zadanych współrzędnych obrazu wynikowego i wyznaczenie obrazu skorygowanego.



Rys. 6. Poprawnie skorygowane zdjęcie z rys. 1.

W praktyce prostszy jest podział obrazu na mniejsze obszary (trójkątne lub czworokątne) i wykonanie prostej interpolacji dwuliniowej.

Literatura

- Calldwell, 2004, *Correcting Distortion and Color Fringing*
<http://www.caldwellphotographic.com>
- J. Canny, 1986, *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 8, No. 6, Nov 1986
- Heath, 1998, Sarkar, Sanocki, and Bowyer, *Comparison of edge detectors: a methodology and initial study*, Computer Vision and Image Understanding 69 (1), 38-54, January 1998
- G. P. Stein, 1997, *Lens distortion calibration using point correspondences*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997,
- R. Y. Tsai, 1987, *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3-d machine vision metrology using off-the-shelf cameras and lenses*, IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 3, 1987.

Recenzował: dr inż. Adam Boroń