

Zautomatyzowana kalibracja kamery szerokokątnej

Niniejszy artykuł prezentuje metodę kalibracji kamery szerokokątnej. W praktyce pomiarowej właściwe skalibrowanie urządzenia pomiarowego jest jednym z najistotniejszych warunków dokładnych pomiarów.

A WIDE-ANGLE CAMERA CALIBRATION

This paper presents a wide-angle camera calibration method. In practice, a correct calibration of measuring device is one of the most important conditions of accurate measurements.

1. WPROWADZENIE

W pomiarowej praktyce najczęściej spotyka się tanie kamery. Ich jakość często pozostawia wiele do życzenia. Często spotyka się błędy optyki, np. nierówną soczewkę czy oś optyczną skierowaną daleko od środka obrazu. Niniejszy artykuł opisuje metodę kalibracji kamery niskiej jakości.

Opisana metoda jest metodą opartą o pomiary. Nie przyjmuje się w niej konkretnego modelu powstawania błędów.

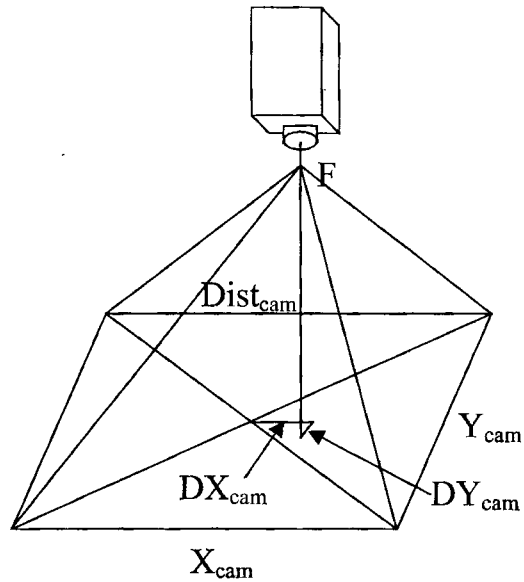
Kalibracja ma na celu wyznaczenie parametrów kamery umożliwiających dokonywanie pomiarów. Do tych parametrów należą: poziomy i pionowy kąt widzenia, rozdzielczość kątowna w poziomie i w pionie oraz zniekształcenia nieliniowe, charakterystyczne dla kamer szerokokątnych. Często zdarza się też asymetria obrazu, wynikająca z umieszczenia środka matrycy kamery poza ogniskiem układu optycznego. Opisana metoda kalibracji pozwala wyznaczenie wymienionych parametrów. Schemat wyznaczanych parametrów pokazuje Rysunek 1. X_{cam} i Y_{cam} oznaczają wymiary widocznego obszaru, które można dokładnie wyznaczyć i wyrazić w jednostkach metrycznych, zaś $Dist_{cam}$ – odległość między ogniskiem kamery i płaszczyzną obserwowanego obszaru. DX_{cam} i DY_{cam} oznaczają przesunięcie osi optycznej na obrazie względem środka obrazu. W praktyce bardzo wygodne jest użycie białej kartki w czarną kratkę o stałych wymiarach.

2. WYZNACZENIE PARAMETRÓW POMIAROWYCH

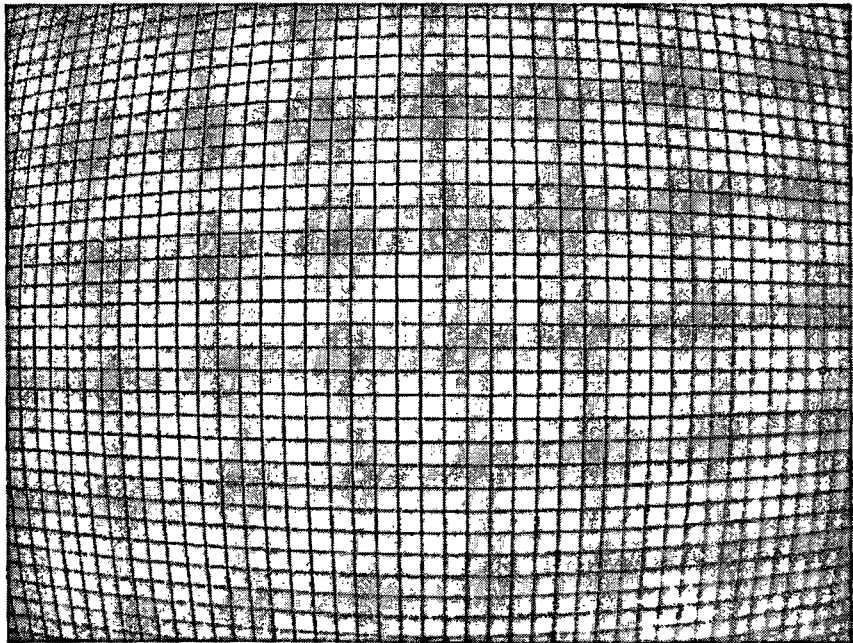
2.1. Akwizycja obrazu kalibrującego

Akwizycja obrazu do kalibracji wymaga odpowiedniej dokładności. Należy zadbać, aby przebiegająca przez środek ekranu linie pozioma i pionowa (są to jedyne linie nie bez zniekształceń beczkowatych) były dokładnie pozioma i pionowa. Dodatkowo należy wyznaczyć współrzędne punktu w obrazie, przez który przechodzi oś optyczna. Punkt ten charakteryzuje się tym, że w miarę zbliżania kamery do kartki wszystkie widoczne węzły siatki oddalają się od niego, zaś przy oddalaniu kamery od kartki wszystkie widoczne węzły siatki zbliżają się do niego. Przy prawidłowym umieszczeniu kartki oś optyczna jest skierowana na przecięcie linii poziomej i pionowej. Przy optymalnym

ustawieniu kartki kamera znajduje się w najdalszej odległości, w której cały obraz jest jeszcze wypełniony kratkami, a linie są ostre i wyraźne. Przykładowy obraz kalibrujący pokazuje Rysunek 2.



Rysunek 1. Parametry wyznaczane podczas kalibracji



Rysunek 2 Przykładowy obraz do kalibracji kamery

2.2. Wyznaczenie zniekształconych linii poziomych i pionowych

Wyznaczenie współrzędnych przecięć, stanowiące podstawę przekształcenia korygującego, można wykonać automatycznie pod warunkiem dobrej jakości obrazu źródłowego. Przebiega ono w następujących etapach:

- Wyznaczenie przebiegu linii poziomych i pionowych
- Uściślenie wyników
- Wyznaczenie punktów przecięcia linii

W pierwszym etapie wyznacza się linie poziome i pionowe za pomocą metody Sobela, o rozmiarze maski 3x3. Oddzielnie wyznacza się obraz linii poziomych i obraz linii pionowych, bez składania ich razem. Metoda ta daje zbyt mało ostre i szerokie krawędzie, dlatego konieczne jest dokładniejsze wyznaczenie przebiegu linii.

Przebieg linii wyznacza się biorąc pod uwagę następujące warunki:

- Linie muszą być ciągłe,
- Zmiany kierunku linii nie mogą być ostre,
- Maksymalne odchylenie linii od kierunku poziomego lub pionowego nie może przekraczać 40° ,
- Linie muszą znajdować się w określonej minimalnej odległości od siebie.
- Gdy linia jest w danym miejscu „szeroka”, tzn. szersza niż 1 piksel, przyjmuje się, że linia przebiega przez punkt w którym jest najintensywniejsza.

Rezultat wyznaczenia przebiegu linii pokazuje Rysunek 3. Rezultat ten jest bardzo ważny, ponieważ zniekształcona siatka została opisana liniami o grubości jednego piksela całkowicie automatycznie. Zastosowany algorytm jest szybki, można też zastosować wersję o subpikselowej dokładności z zastosowaniem interpolacji.

2.3. Wyznaczenie widocznego obszaru

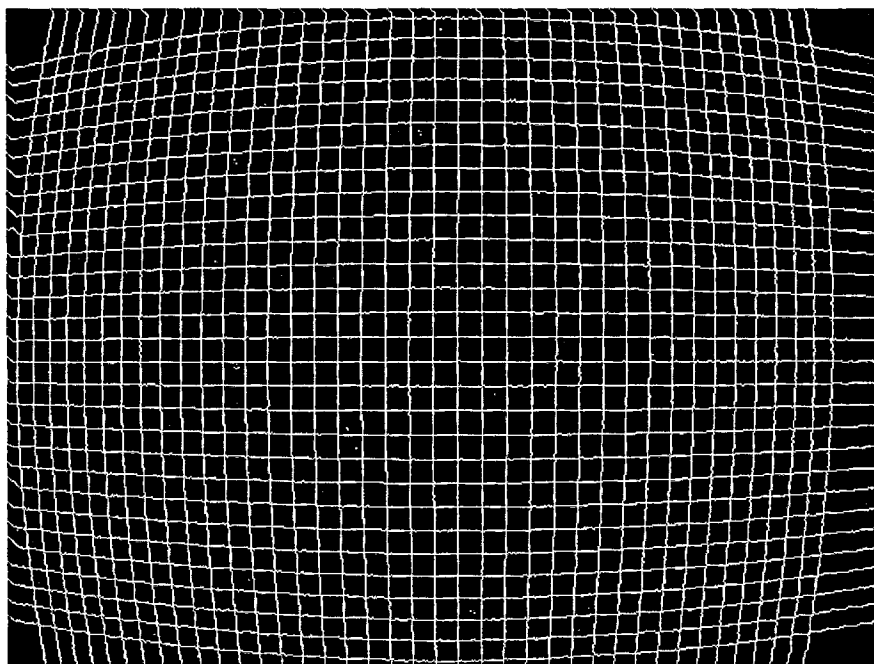
Linie kratki są na ogół linie zakrzywione przez zniekształcenia nieliniowe. Zniekształcenia te są usuwane podczas korekcji obrazu. Wyznaczenie widocznego obszaru wymaga wyznaczenia przebiegu linii na obrazie kalibrującym, a następnie wybraniu do korekcji tylko tego fragmentu, który jest zamknięty przez linie przebiegające przez cały obraz. Znając rozmiar pojedynczej kratki i licząc ilość linii przebiegających przez cały obraz wyznacza się rozmiary liniowe obszaru widocznego i przeznaczonego do korekcji.

2.4. Wyznaczenie kierunku osi optycznej

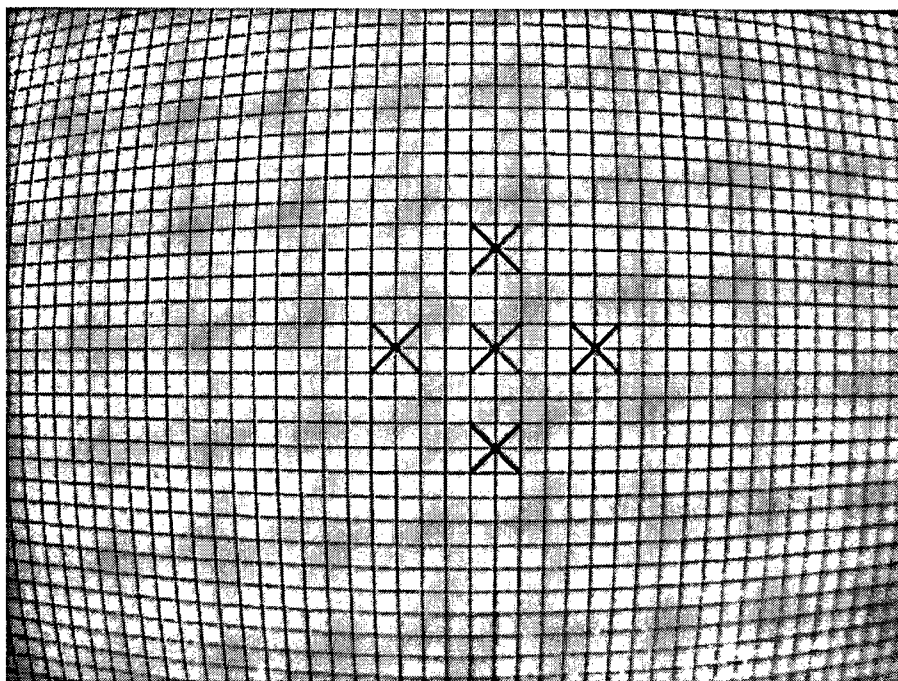
Współrzędne osi optycznej wymaga wcześniejszego wyznaczenia położenia osi optycznej w obrazie przed korekcją i takiego przygotowania obrazu, aby znajdował się on na przecięciu linii poziomej i pionowej. W obrazie docelowym punkt ten znajduje się w jednym z węzłów transformacji korygującej obraz i można go odczytać wprost z tablicy przekształcenia. Rysunek 4 pokazuje siatkę z wyróżnionym punktem na który skierowana jest oś optyczna.

Wykrycie tego punktu jest dość łatwe. Jest to miejsce charakteryzujące się tym, że podczas oddalania kamery od kartki wszystkie pozostałe punkty zbliżają się do niego, a

podczas zbliżania kamery – oddalają się. Punkt ten powinien znajdować się na przecięciu linii siatki.



Rysunek 3 Automatycznie uzyskany wzór siatki



Rysunek 4 Obraz siatki z wyróżnionym kierunkiem osi optycznej

3. KOREKCJA ZNIEKSZTAŁCEŃ

3.1. Wyznaczenie współrzędnych przecięć linii

Po wyznaczeniu przebiegu linii należy wyznaczyć punkty przecięcia linii. W najprostszym przypadku, gdy linia pozioma i pionowa są dokładnie proste w otoczeniu tego punktu, jest to dokładnie jeden punkt. Ponieważ linia może nie być dokładnie pozioma lub pionowa w otoczeniu punktu przecięcia, należy wyznaczyć średnią współrzędną linii w otoczeniu tego punktu – w implementacji otoczenie ma wielkość 5 punktów.

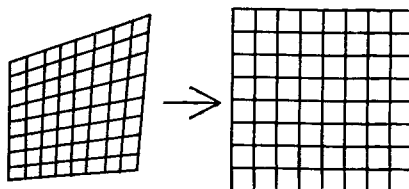
W wyniku wyznaczenia węzłów otrzymuje się tablicę współrzędnych wszystkich narożników siatki konwertowanej podczas korekcji zniekształceń.

3.2. Korekcja zniekształceń

Korekcja zniekształceń polega na wyznaczeniu transformacji obrazu wzorcowego (zniekształconego) w obraz nie zniekształcony. Obraz nie zniekształcony powinien być rzutem prostokątnym kratki, czyli składać się z prostokątów lub kwadratów o jednakowych rozmiarach. W wyniku wyznaczenia węzłów otrzymuje się tablicę współrzędnych wszystkich narożników siatki konwertowanej podczas korekcji zniekształceń. Konwersja obrazu odbywa się przez konwersję czworokątów stanowiących zniekształcone kratki do krutek nie zniekształconych, o znanych z góry rozmiarach i położeniu. W ten sposób wyznacza się mapę przekształcenia, stosowaną do korekcji wszystkich kolejnych obrazów uzyskanych przy tych samych parametrach układu optycznego. Mapę zniekształceń można łatwo przechować w pamięci masowej w postaci np. tablicy węzłów lub obrazu z zaznaczonymi wyłączenie węzłami.

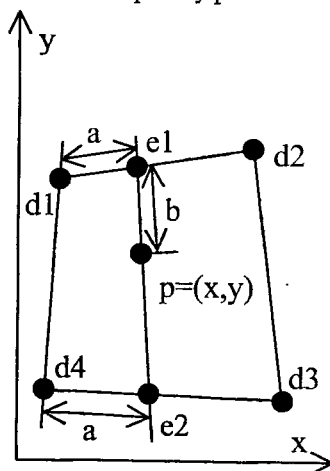
3.3. Korekcja pojedynczej kratki

Korekcja kratki sprowadza się do przekształcenia jej w prostokąt. Ze względu na małe rozmiary kratki można bezpiecznie założyć, nie wprowadzając dużego błędu, że zniekształcona kratka jest czworokątem opisanym współrzędnymi wierzchołków. Wówczas korekcja jest przekształceniem afinicznym, a dokładniej dwuliniowym. Zasadę przekształcenia dwuliniowego pokazuje Rysunek 5.



Rysunek 5 Przekształcenie dwuliniowe odwzorujące czworokąt w kwadrat

Rysunek 6 przedstawia punkty d_1, d_2, d_3, d_4 definiujące czworokąt, definicję punktu p przez współrzędne wynikowe a i b oraz punkty pośrednie e_1 i e_2 .



Rysunek 6 Wyznaczenie współrzędnych punktu w obrazie wejściowym na podstawie znajomości współrzędnych w obrazie wyjściowym

Przekształcenie dwuliniowe korygujące pojedynczy prostokąt polega na wyznaczeniu parametrów a i b na podstawie współrzędnych punktów d_1, d_2, d_3, d_4 i p dla każdego piksla obrazu. W rzeczywistości stosowane jest przekształcenie odwrotne, tzn. znane są parametry a i b dla każdego piksla obrazu wynikowego, a konieczne jest wyznaczenie odpowiadających im współrzędnych x i y w obrazie wejściowym. Wyznaczenie tych współrzędnych przebiega następująco: [4]

- Wyznaczenie punktów e_1 i e_2 położonych na bokach czworokąta proporcjonalnie do wartości parametru a ;
- Wyznaczenie punktu p leżącego na linii e_1 - e_2 proporcjonalnie do wartości b .

Współrzędne punktów e_1 i e_2 wyznacza się według wzorów:

$$e_1(a) = d_1 + a(d_2 - d_1) \quad (1)$$

$$e_2(a) = d_4 + a(d_3 - d_4) \quad (2)$$

Rzeczywiste współrzędne wyznacza się wstawiając współrzędne punktów $d_1 - d_4$ do powyższych wzorów. Współrzędne punktu p wyznacza się według wzoru:

$$p(a,b) = e_1 + b(e_2 - e_1) = d_1 + a(d_2 - d_1) + b(d_4 - d_1) + ab(d_1 - d_2 + d_3 - d_4) \quad (3)$$

Wartości parametrów a i b są liczbami z zakresu od $\frac{0}{n}$ do $\frac{n-1}{n}$, gdzie n jest długo-

ścią odpowiednio poziomego i pionowego boku podstawowego prostokąta w skorygowanym obrazie wzorca. Przyjęty sposób wyznaczania parametrów powoduje, że mieszczą one w zakresie od 0 do 1.

Wyznaczenie mapy przekształcenia sprowadza się do wyznaczenia współczynników przekształcenia dwuliniowego dla każdej kratki.

Wielkość krutek wynikowych jest dopasowana do wielkości największej kratki w obrazie przed korekcją. Obraz po korekcji jest większy niż obraz przed korekcją.

4. MAKSYMALIZACJA DOKŁADNOŚCI

Dokładność kalibracji zależy od wyznaczenia parametrów mierzonych bezpośrednio. Błędy kalibracji są błędami systematycznymi w późniejszych pomiarach, dlatego powinny być możliwie najmniejsze. Niedokładnie równoległe ustawienie płaszczyzny kratki względem płaszczyzny kamery lub obrót w płaszczyźnie równoległej będą powodować rzutowanie obrazu na inną płaszczyznę niż wyznaczona.

Odległość $Dist_{cam}$ między ogniskiem kamery a płaszczyzną kartki może być trudna do wyznaczenia. Jednak łatwo można zmierzyć odległość od obiektywu do kartki, co przy znajomości ogniskowej pozwala wyznaczyć $Dist_{cam}$. Dobrym rozwiązaniem jest np. umocowanie kamery w statywie nad poziomo leżącą kartką.

Wyznaczenie docelowego (teoretycznego) położenia krutek jest bardzo dokładne. Rozmiary obszaru widzianego po korekcji są całkowitymi wielokrotnościami rozmiaru kratki, dlatego głównym źródłem błędów systematycznych tych wielkości jest złe wyznaczenie rozmiaru kratki. Ponieważ wielkość ta jest zwykle znana bardzo dokładnie (typowo wynosi np. 5mm), błąd wprowadzony w tym etapie można pominąć.

Dokładność przekształcenia dwuliniowego zależy przede wszystkim od dokładności wyznaczenia węzłów. Błąd przekształcenia jest nie większy niż błędy wyznaczenia położenia współrzędnych narożników czworokąta w obrazie źródłowym, co zostało wykazane w pracy [ref]. W eksperymentach przyjęto dokładność 1 piksla podczas wyznaczenia przebiegu linii oraz wyznaczenia współrzędnych przecięć linii. Możliwe jest zwiększenie dokładności przez interpolację większej rozdzielczości.

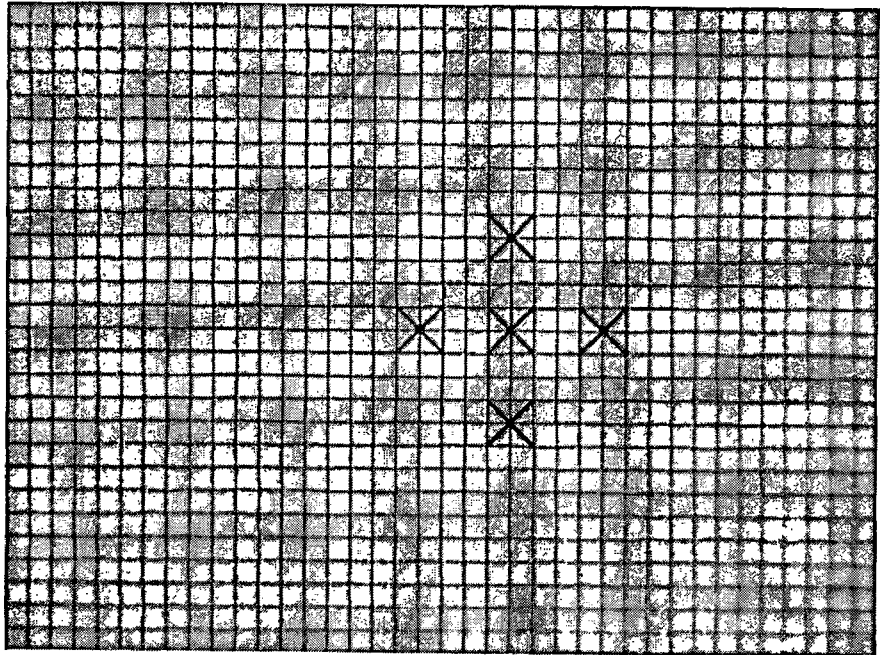
5. EKSPERYMENTY

Eksperymenty przeprowadzono kalibrując kamerę NX-Ultra firmy Creative Labs. Kamera ma bardzo krótką ogniskową, nie podaną w dokumentacji i nie znając pracownikom działu kontaktu z klientem. Jest ona jednak na tyle mała, że obiekt znajdujący się przy kamerze w odległości 1-2 mm nie jest odwracany, (dopóki nie zasłania się całkowicie światła), co sugeruje wielkość nie większą niż 2-3 mm. Podczas eksperymentów

wielkość ta została przyjęta za równą 0. Rysunek 7 przedstawia zdjęcie siatki kalibrującej z zaznaczonym miejscem skierowania osi optycznej po korekcji.

Największa odległość z dobrą ostrością linii dla tej kamery to ok. 16cm. Obszar korygowany obejmuje 38x28 kratak o rozmiarze 5x5 mm. Obraz wzorcowy po korekcji (z zaznaczonym kierunkiem osi optycznej) przedstawia Rysunek 7.

Stosując otrzymane wyniki i uwzględniając przesunięcie osi optycznej przeprowadzono pomiary odległości obiektu o znanym rozmiarze. Dla obiektu o wysokości 70cm widzianego z odległości 2-4 metrów błąd wyznaczenia odległości wynosił nie więcej niż 1-3%.



Rysunek 7 Położenie osi optycznej po korekcji obrazu

6. WNIOSKI

Opisana metoda pozwala na kalibrację prawie dowolnej kamery szerokokątnej. W trakcie kalibracji buduje się model zniekształceń, złożony z korekcji geometrii oraz korekcji położenia osi optycznej. Model ten stosuje się do późniejszych korekcji obrazu.

7. LITERATURA

1. *A. Borkowski, I. Hallmann, korekcja zniekształceń nieliniowych obrazu, Automation 2002 – automatyzacja – nowości i perspektywy, p 429-434*
2. *R.C. Gonzalez, P. Wintz Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1987*

- 3 *D. Watkins, A. Sadun, S. Marenka* Nowoczesne metody przetwarzania obrazu, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995
- 4 *R. Swaminathan, S. Nayar* Non-Metric Calibration of Wide-Angle Lenses and Polycameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, issue 10, p1172-1178, IEEE computer Society, 2000