

KOREKCJA ZNIEKSZTAŁCEŃ NIELINIOWYCH OBRAZU

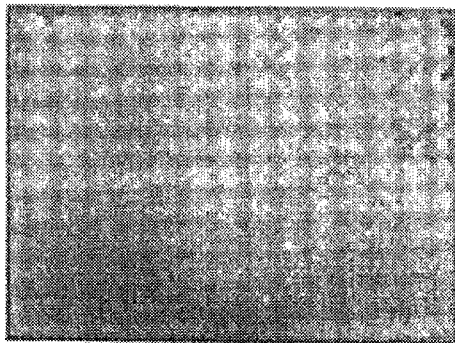
W artykule przedstawiona jest metoda korekcji zniekształceń nieliniowych obrazu cyfrowego uzyskanego z kamery. Metoda pozwala na szybką korekcję dla kamery z dowolnym układem optycznym o niezmiennych parametrach, również o skomplikowanym modelu. Może ona znaleźć zastosowanie w wielu sytuacjach, w których konieczny jest pomiar rozmiarów obiektów na obrazie, np. w lokalizacji robota mobilnego, systemach nawigacji z obserwacją terenu przy użyciu kamery czy w systemach wspomagających kierowcę.

METHOD OF IMAGE NONLINEAR CORRECTION DISTORTIONS

In that paper is presented a method of nonlinear distortions correction of a digital image taken from a camera. This method allows to fast correction of images from cameras with any optics described by constant parameters, even when a model of optics is complicated. The method can be used in many situations, in whose is necessary to measure sizes of objects in the image; e.g. in mobile robot localization, navigation systems with terrain observation using a camera, or in driver supporting systems.

1. POWSTAWANIE ZNIEKSZTAŁCEŃ NIELINIOWYCH

Zniekształcenia geometryczne obrazu są efektem wprowadzanym przez układ optyczny większości kamer i aparatów fotograficznych. Chociaż istnieją specjalne układy optyczne eliminujące te zniekształcenia, są one drogie. W przypadku obrazów cyfrowych zniekształcenia geometryczne można usunąć z obrazu przez zastosowanie odpowiedniego algorytmu. Na Rys. 1 zamieszczono przykład zniekształceń nieliniowych na obrazie kartki w kratkę uzyskanym z kamery.



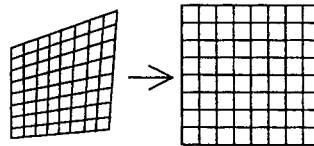
Rys. 1 Przykład zniekształceń nieliniowych obrazu powstających w kamerze

2. ALGORYTM KOREKCJI

Analityczne algorytmy korekcji zniekształceń opierają się na modelu powstawania zniekształceń. Uwzględniają jedynie efekt rzutowania strefy widzianej obiektywem kamery na prostokątny obszar obrazu. Metoda ta wymaga analizy modelu rzutowania przestrzeni na prostokątny obraz. Proponowana w tym artykule metoda nie wymaga budowy modelu rzutowania sceny i powstawania obrazu. Korekcja jest wykonywana na podstawie modelu zniekształceń obrazu. Jest on wykonywany przez uzyskanie obrazu obszaru wzorcowego, którym jest dla zwykłej kamery kartka w prostokątną kratkę. Obraz wzorcowej siatki dzieli się na obraz czworokątnych oczek. Korekcja zniekształceń polega na przekształceniu każdej kratki w zniekształconym obrazie w kratkę o prawidłowym rozmiarze i położeniu przy zastosowaniu przekształcenia dwuliniowego. Podczas korekcji wzorca wyznacza się przekształcenie zniekształconego obrazu siatki w obraz niezniekształcony na poziomie pojedynczych pikseli, co umożliwia korekcję dowolnego obrazu w ten sam sposób. Musi przy tym być spełnione założenie na tyle małych rozmiarów prostokątów w obrazie wzorca, że boki zniekształconych prostokątów mogą być traktowane jako proste, a same zniekształcone prostokąty jako czworoboki. Koniecznym warunkiem stosowalności metody jest niezmiennosć zniekształceń pomiędzy uzyskiwaniem obrazu wzorca i pozyskiwaniem korygowanych obrazów.

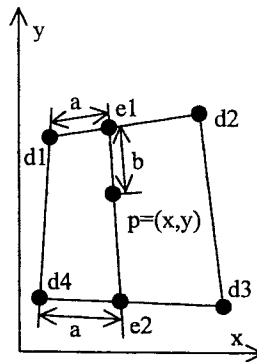
2.1. Zniekształcenie dwuliniowe

Odwzorowanie czworokątów w kwadrat wykonuje się przy użyciu przekształcenia dwuliniowego. Zasadę przekształcenia przedstawiono na Rys. 2



Rys. 2 Przekształcenie dwuliniowe odwzorujące czworokąt w kwadrat

Na Rys. 3 pokazano 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 .



Rys. 3 Wyznaczenie współrzędnych punktu w obrazie wyjściowym 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:

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

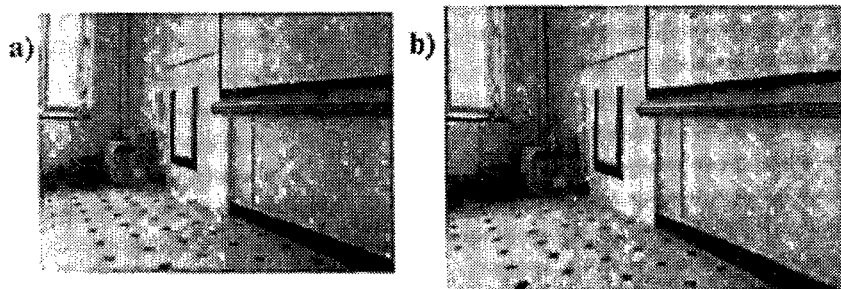
Wartości parametrów a i b są liczbami z zakresu od $\frac{0}{n}$ do $\frac{n-1}{n}$, gdzie n jest długością odpowiednio poziomego i pionowego boku podstawowego prostokąta w skorygowanym obrazie wzorca. Przyjęty sposób wyznaczania parametrów powoduje, że mieszczą się one w zakresie od 0 do 1.

2.2. Implementacja

Stosowana metoda wyznaczania współrzędnych w obrazie wejściowym powoduje, że są one liczbami rzeczywistymi, a nie całkowitymi. W implementacji stosowane są dwie interpretacje tych wartości:

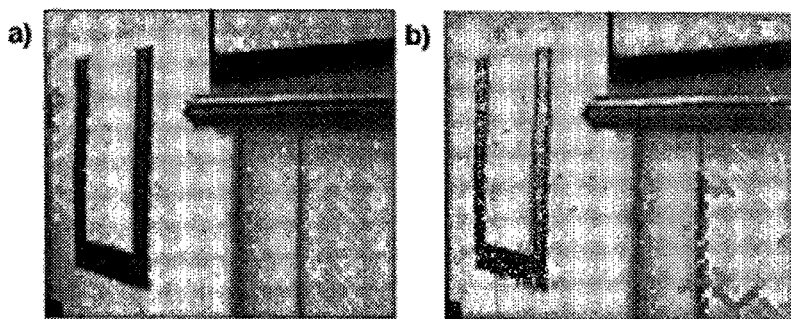
- piksel ma barwę punktu obrazu wejściowego położonego najbliżej wyznaczonego punktu p ;
- barwa punktu jest średnią ważoną barw punktów leżących bliżej wyznaczonego punktu p niż jego sąsiadów wyznaczonych dla innych parametrów a i b .

Korekcja pierwszą metodą przebiega szybciej niż drugą ze względu na interpolację barw w metodzie drugiej. Z kolei obraz uzyskany z zastosowaniem interpolacji jest lepszej jakości. Na Rys. 4a) zamieszczono zniekształcony obraz przed korekcją, na Rys. 4b) ten sam obraz po korekcji.



Rys. 4 Przykładowy obraz: a) po uzyskaniu z kamery i ze zniekształceniami; b) ten sam obraz po korekcji zniekształceń

Na Rys. 5 pokazano porównanie jakości obrazu uzyskanego: Rys. 5a) bez interpolacji i Rys. 5b) z interpolacją. Widoczne są nierówne krawędzie na obrazie Rys. 5a), oraz gładkie krawędzie na obrazie Rys. 5b).



Rys. 5 Porównanie jakości obrazu po korekcy: a) bez interpolacji barw; b) z interpolacją barw

2.3. Złożoność obliczeniowa algorytmu

Złożoność obliczeniowa przekształcenia wyraża się wzorem:

$$Z = C_1 X_w Y_w + C_2 X_w Y_w \overline{x_o y_o} \quad (4)$$

Stałe C_1 i C_2 są duże (mniejsza z nich C_1 wynosi 23 mnożenia stałoprzecinkowe + 24 mnożenia zmiennoprzecinkowe + 23 dodawania). Symbole $\overline{x_o}$ i $\overline{y_o}$ oznaczają średnie wymiary otoczenia piksla, w którym wyznaczana jest jego barwa (dla danej metody wyznaczania wartości rozmiary te są stałe), zaś X_w i Y_w są rozmiarami obrazu wynikowego w pikslach.

Korekcja pojedynczego obrazu na komputerze PC z procesorem Pentium Pro 350MHz trwa 7 sekund dla obrazu wejściowego o rozmiarach 648 na 480 piksli i obrazu wyjściowego o rozmiarze 728 na 527 piksli. Aplikacje działające w czasie rzeczywistym wymagają czasu korekcji nie przekraczającego 0,2 sekundy. Uzyskanie takiego czasu jest możliwe i zostało osiągnięte dzięki stabilizowaniu przekształcenia. Złożoność obliczeniowa budowy tablicy przekształcenia jest prawie identyczna jak złożoność samego przekształcenia. Samo przekształcenie zostało zredukowane do przepisania ciągu piksli z obrazu wejściowego do obrazu wyjściowego z zastosowaniem tablicy indeksów. Złożoność obliczeniowa tej fazy jest mała i ograniczona z góry wyrażeniem:

$$Z_{\min} = \left[(\overline{x_o y_o} C_3 + C_4) p_i + C_5 (1 - p_i) \right] XY, \text{ gdzie:} \quad (5)$$

- X i Y są wymiarami obrazu wynikowego,
- $\overline{x_o}$ i $\overline{y_o}$ są średnimi rozmiarami otoczenia piksla źródłowego, z którego wyliczana jest barwa piksla wynikowego,
- C_3 wynosi jedno mnożenie i dwa dodawania,
- C_4 wynosi jedno mnożenie
- C_5 wynosi dwa dodawania
- p_i jest prawdopodobieństwem, że barwa piksla wyjściowego jest interpolowana z barw co najmniej dwu piksli wejściowych.

Wszystkie operacje wykonywane podczas korekcji są stałoprzecinkowe.

2.4. Skrócenie czasu działania

W wariancie bez interpolacji wartości tablica składa się z indeksów piksli obrazu wejściowego, które powinny znaleźć się w miejsce piksli wyjściowych. W wariancie z interpolacją w tablicy znajdują się indeksy kolejnych piksli obrazu wejściowego składające się na kolejne piksele obrazu wyjściowego. W dodatkowej tablicy znajdują się ilości piksli wejściowych składających się na piksel wyjściowy. Wszystkie tablice są budowane na starcie programu. Podane poniżej czasy korekcji przy użyciu gotowych tablic odnoszą się dla obrazu wejściowego w 256 poziomach szarości, o rozmiarze 640 na 480 piksli konwertowanego na obraz wyjściowy o rozdzielczości 728 na 527 piksli. Dla obrazu wejściowego i prezentowanej maski czas budowy tablic (a zarazem korekcji obrazu bez tablic) wynosi 7 sekund, zaś czas wykonywania przekształcenia na podstawie tablic – 43 ms dla wariantu bez interpolacji i 124 ms przy interpolacji poziomu szarości. Podane czasy zostały uzyskane przy użyciu kompilatora Visual C++ v6.0 i programu w konfiguracji „Release”. Wszystkie podane czasy zostały zmierzone na komputerze PC z procesorem Pentium Pro 350MHz pracującego pod kontrolą systemu operacyjnego Windows NT 4.0.

Uzyskanie tak dużego przyspieszenia wiąże się jednak z stosunkowo dużą ilością pamięci operacyjnej zajmowanej przez tablice. Przy założeniu, że liczby typu *int* oraz wskaźniki do nich są 32-bitowe, łączna zajętość pamięci przez tablice wariantu z interpolacją wynosi 15 MB, zaś dla wariantu bez interpolacji 3 MB.

3. DOKŁADNOŚĆ PRZEKSZTAŁCENIA

Błędy w obrazie wynikowym są wprowadzane przez sam mechanizm korekcji. Mogą też być spowodowane błędem ustawienia siatki wzorcowej względem kamery.

Mechanizm korekcji wymaga wyznaczenia węzłów zniekształconej siatki. Są one wyznaczone z dokładnością do jednego piksela i taki może być w założeniu maksymalny błąd określenia położenia węzła siatki. W konkretnym przypadku współrzędne węzłów były wyznaczone ręcznie i faktyczny błąd nie jest większy niż jeden piksel. Poniżej zamieszczono analizę wpływu błędu wyznaczenia współrzędnych węzłów siatki na współrzędne punktu obrazu wejściowego znając współrzędne (*a*, *b*) punktu w obrazie wynikowym. Współrzędna *x* wyraża się wzorem:

$$x(a, b) = x_1 + a(x_2 - x_1) + b(x_4 - x_1) + ab(x_1 - x_2 + x_3 - x_4). \quad (6)$$

Po przekształceniu wzór ten można zapisać:

$$x(a, b) = x_1(1 - a - b + ab) + x_2(a - ab) + x_3ab + x_4(b - ab). \quad (7)$$

Wszystkie czynniki przy współrzędnych są dodatnie i mniejsze niż 1. Największy błąd występuje, gdy błędy wszystkich współrzędnych mają tę samą wartość, czyli +1 albo -1. Maksymalnie zakłócona wartość *x* wyraża się wzorem:

$$x_{\max}(a, b) = (x_1 + 1)(1 - a - b + ab) + (x_2 + 1)(a - ab) + (x_3 + 1)ab + (x_4 + 1)(b - ab) = x(a, b) + 1 \quad (8)$$

Analogicznie wyraża się błąd współrzędnej *Y*. Ze wzoru (8) wynika, że maksymalny błąd współrzędnych wszystkich punktów wewnątrz czworokąta wynosi 1 piksel i występuje, gdy wszystkie wierzchołki czworokąta są przesunięte w tę samą stronę. Jako, że korekcja jest odwzorowaniem powiększającym, błąd wprowadzony przez zaokrąglenie współrzędnych jest nie większy niż 1 piksel. Suma obu wyznaczonych maksymalnych błędów wynosi 2 piksele i jest to maksymalna wielkość dodatkowego zniekształcenia, jakie może wprowadzić korekcja.

4. WNIOSKI

Przedstawiona metoda pozwala na korekcję zniekształceń nieliniowych obrazu powstających podczas akwizycji. W prezentowanej aplikacji dokładność korekcji wynosi 2 piksele. Choć złożoność przekształcenia powoduje dość długi czas trwania konwersji, możliwe jest zredukowanie tego czasu do wartości akceptowalnych w zastosowaniach czasu rzeczywistego.

5. BIBLIOGRAFIA

1. I. Hallmann, B. Siemiątkowska, Nawigacja robota mobilnego z użyciem sztucznych znaczników, *VII Krajowa Konferencja Robotyki*, Prace Naukowe ICT PW, Wrocław, 2001, p 177-184
2. R.C. Gonzalez, P. Wintz *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1987
3. R. Bączyk, Metody korekcji zniekształceń obrazów w systemie lokalizacji robota mobilnego, *VII Krajowa Konferencja Robotyki*, Prace Naukowe ICT PW, Wrocław, 2001, p 185-194
4. D. Watkins, A. Sadun, S. Marenka *Nowoczesne metody przetwarzania obrazu*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995