

Mirosław Jabłoński*

Konfiguracja sceny w systemie wizyjnym z nieruchomą kamerą**

1. Wprowadzenie

Jednym z celów stosowania systemów wizyjnych jest pozyskiwanie informacji o rozmiarach i lokalizacjach obiektów obecnych na tle statycznej sceny. Znanych jest wiele sprawnych algorytmów wizyjnej detekcji obiektów oraz zdarzeń opartych na sygnale wizyjnym. Uzyskanie wiarygodnych wyników najczęściej wymaga ustalenia szeregu parametrów (progi, kształty elementów strukturalnych, rozmiary filtrów kontekstowych, skale) dobieranych do kształtów i rozmiarów poszukiwanych obiektów. Nawet stosowanie metod w pełni automatycznych, takich jak np. estymacja tła [11], wyznaczanie przepływu optycznego (*optical flow*) [8] lub detekcja punktów charakterystycznych [7] wiąże się z koniecznością umiejscowienia wyników działania (obiektów, punktów charakterystycznych lub wektorów) w obszarze przestrzeni trójwymiarowej sceny. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w fotogrametrycznych systemach pomiarowych służących np. do pomiaru odległości, rozmiarów obiektów lub ich prędkości [10], ale również w systemach dozoru, gdzie ważne jest miejsce wystąpienia zdarzenia i skala występujących zmian. W przypadku zastosowania nieruchomej kamery, odtworzenie rzeczywistego położenia punktów jest utrudnione ze względu na płaską reprezentację widoku obiektów trójwymiarowych oraz zniekształcenia. Zadanie to jest jednak w ograniczonym zakresie możliwe do zrealizowania pod warunkiem znajomości parametrów urządzenia obrazującego oraz modelu sceny. Wydaje się, że pozyskane w ten sposób dane mogą być przydatne w systemach automatycznego rozumienia opartego na sygnale wizyjnym [12].

Zagadnieniem poruszonym w niniejszym artykule jest proces konfiguracji systemu wizyjnego umożliwiający przestrzenną lokalizację punktów obiektów i zdarzeń w scenie. Przedstawiono wyniki eksperymentu polegającego na dwuetapowej konfiguracji systemu.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektrotechniki, Katedra Automatyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

** Praca wykonana w ramach projektu „SIMPOZ”, nr umowy z MNISW: 0128/R/t00/2010/12

W pierwszym etapie eksperymentu przeprowadzono kalibrację wewnętrznych parametrów kamery z wykorzystaniem przestrzennego wzorca kalibracyjnego. Następnie przeprowadzono konfigurację trzech elementów sceny istotnych w systemach dozoru: posadzki pomieszczenia, ściany, wnętrza drzwi. Na podstawie zrekonstruowanej płaszczyzny podłogi utworzono trajektorię obiektu poruszającego się po scenie.

2. Parametry systemu analizy sceny

W ogólności, problem konfiguracji może być rozpatrywany dla wielu kamer obserwujących fragment wspólnej sceny lub też jednej kamery przemieszczającej się względem sceny. Tutaj jednak ograniczono się do elementarnego przypadku analizy sceny przez jedną nieruchomą kamerę o stałych parametrach. Głównym celem konfiguracji jest przyporządkowanie punktów dwuwymiarowego obrazu kamery kolorowej lub czarnobiałej do określonych miejsc w trójwymiarowej przestrzeni obserwowanej sceny i niwelacja zniekształceń obiektów sceny. Większość opublikowanych metod wspomnianych w poniższych rozdziałach wskazuje na konieczność uprzedniego ustalenia parametrów kamery [7, 10, 14, 15, 16].

Podczas formowania obrazu w czujniku kamery występuje wiele zniekształceń i zakłóceń, które deformują i redukują informację zawartą w analizowanej scenie. Najistotniejszym zjawiskiem występującym podczas analizy scen 3D jest perspektywa wprowadzająca zniekształcenia zależne od odległości punktu od kamery [2]. Kolejne aberracje i zakłócenia wprowadzane są przez niedoskonałości układu optycznego soczewek obiektywu. Zarówno zniekształcenia obiektywu, jak i efekty perspektywy mogą być częściowo zniwelowane dzięki znajomości parametrów i modeli opisujących te zjawiska.

2.1. Parametry wewnętrzne kamery

Parametry wewnętrzne kamery są charakterystyczne dla danego urządzenia, a ich wartość nie zależy od obserwowanej sceny. Kamera charakteryzowana jest przez macierz A parametrów wewnętrznych (1) związanych z wymiarami czujnika oraz ogniskową obiektywu. Najczęściej można założyć, że układ optyczny jest symetryczny, zatem $f_x \approx f_y$, a punkt centralny c pokrywa się ze środkiem matrycy.

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

- A – macierz parametrów wewnętrznych kamery,
- f_x – ogniskowa pozioma matrycy czujnika,
- f_y – ogniskowa pionowa matrycy czujnika,
- $[c_x, c_y]$ – współrzędne punktu centralnego w układzie matrycy czujnika.

Do parametrów wewnętrznych należy zaliczyć również użyte w równaniu (3) współczynniki zniekształceń radialnych $r_1 r_2 r_3$ oraz tangensoidalnych $p_1 p_2$.

2.2. Projekcja perspektywiczna i zniekształcenia obiektywu

Parametry zewnętrzne kamery wyznaczają układ współrzędnych związany z obserwowaną sceną. Jego dobór jest arbitralny, jednak jest on powiązany z układem współrzędnych nieruchomej kamery poprzez macierz rotacji R oraz wektor translacji T . Projekcja obrazu punktu z przestrzeni trójwymiarowej na matrycy czujnika kamery opisywana jest najczęściej przez tzw. model punktowej kamery perspektywicznej (2 – 5) (*pin hole camera*) [5]. Czynniki z^{-1} powoduje zniekształcenia wymiarów wzdłuż osi optycznej kamery oraz opisuje przesłanianie obiektów.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = z^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'^2) \\ y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 x' y' + p_1 (r^2 + 2y'^2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2 \quad (4)$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie:

R – macierz rotacji zewnętrznego układu współrzędnych względem kamery,
 T – wektor translacji zewnętrznego układu współrzędnych względem kamery,

$[X Y Z]$ – rzeczywiste położenie punktu w zewnętrznym układzie współrzędnych,

$[x' y' 1]$ – współrzędne rzutu punktu na płaszczyznę,

$[x'' y'' 1]$ – współrzędne rzutu punktu na płaszczyznę zaburzone przez obiektyw,

$r_{11}, \dots, r_{33}$ – współczynniki rotacji – elementy macierzy R ,

r_1, r_2, r_3 – współczynniki zniekształceń centrycznych,

p_1, p_2 – współczynniki zniekształceń tangensoidalnych,

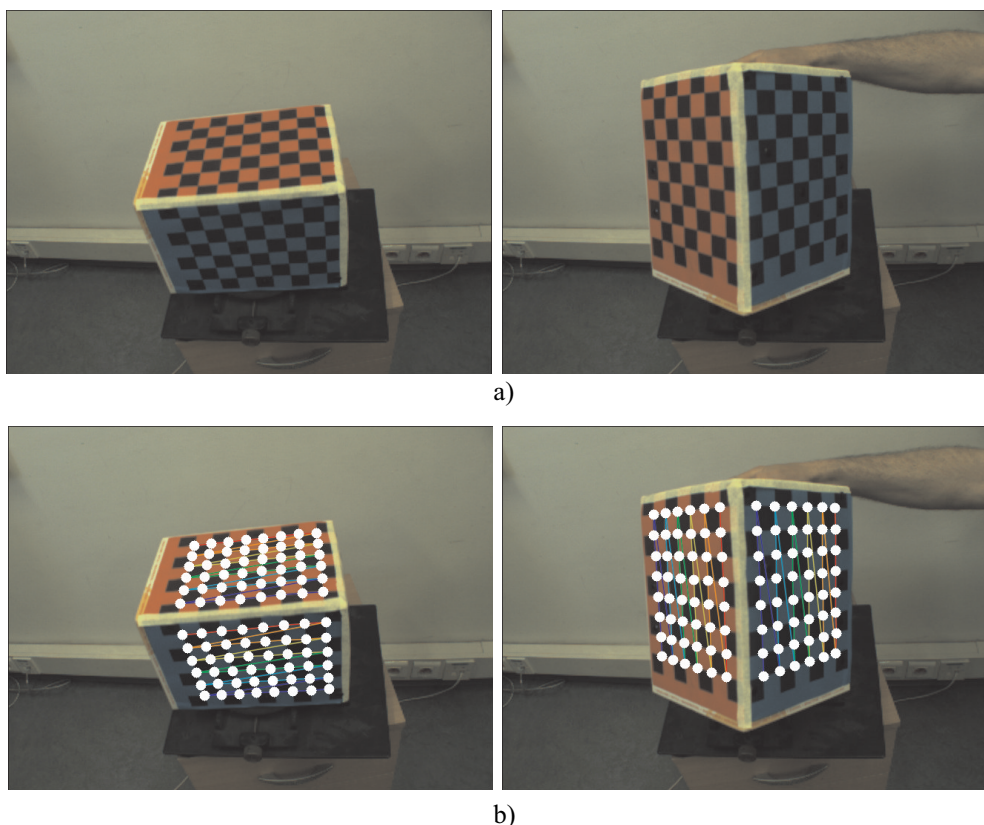
$[u, v, 1]$ – współrzędne punktu obserwowane w układzie współrzędnych kamery,

s – współczynnik skalujący zależny od matrycy czujnika wizyjnego.

Wpływ obiektywu o skończonych rozmiarach, wprowadzającego zniekształcenia geometryczne opisują równania (3)(4). W przypadku pominięcia tego efektu należy przyjąć $x'' = x'$ oraz $y'' = y'$.

3. Kalibracja parametrów wewnętrznych kamery

W klasycznej metodzie, do kalibracji systemu wizyjnego o nieznanych parametrach wykorzystuje się dedykowany wzorec kalibracyjny o znanej topologii. W najprostszym przypadku może być to plansza z naniesioną siatką punktów umożliwiającą jednoznaczną detekcję. Wzorec prezentowany jest w obszarze widzenia kamery pod różnymi kątami. Może to być również wiele nierównoległych planszy (np. umieszczonych na bokach prostopadłościanu) [15]. Autorzy publikacji [13] wykorzystali do kalibracji obrazy kul, aby na podstawie zniekształcenia konturów sfery przeprowadzić kalibrację.



Rys. 1. Wzorec do kalibracji parametrów wewnętrznych kamery: a) widoki wzorca przestrzennego w różnych orientacjach; b) automatycznie wykryte punkty siatki kalibracyjnej naniesione na widoki wzorca

W niektórych zastosowaniach [4] wystarczające są 4 punkty na płaszczyźnie lub 6 punktów charakterystycznych dla wzorca przestrzennego w kształcie sześcianu, który stanowi złożenie dwóch płaskich wzorców przylegających krawędziami. Pierwotnie w kalibracji kamer [13, 14] wykorzystywano algorytm DLT (*Discrete Linear Transform*). Alternatywna metoda bazuje na iteracyjnym algorytmie optymalizacji Levenberga-Marquardta, który w trakcie działania minimalizuje błędy estymacji szukanych wartości [16]. Obie metody pozwalają wyznaczyć zarówno macierz kamery A (1) wraz ze współczynnikami zniekształceń obiektywu, jak i zewnętrzne parametry określające położenie i orientację planszy względem skalibrowanej kamery: R i T (2). Znane są również algorytmy działające bez dedykowanych wzorców, wykorzystujące do kalibracji różne widoki tej samej sceny, różne widoki tego samego obiektu w różnych pozach (np. sylwetka ludzka) [9] lub sygnał przepływu optycznego (*optic flow*) [10]. W obu wypadkach niejawnie zakłada się, że analizowane obiekty są ciałami sztywnymi.

W niniejszym opracowaniu do kalibracji wykorzystano wzorec przestrzenny (patrz rys. 1a) składający się z dwóch identycznych plansz umieszczonych na przyległych bokach prostopadłościanu. Rozwiązanie takie umożliwia jednocześnie uzyskanie dwóch zbiorów punktów referencyjnych o różnych orientacjach względem kamery. Prezentacja wzorca w różnych pozach pozwala zgromadzić więcej danych do kalibracji, co ma istotny wpływ na dokładność wyznaczanych współczynników kamery. Punkty charakterystyczne na planszy kalibracyjnej mogą być wyznaczane ręcznie lub automatycznie, jak to zaprezentowano na rysunku 1b). Zastosowano tutaj dedykowaną do kalibracji procedurę detekcji narożników szachownicy dostępną w bibliotece OpenCV [17].

4. Konfiguracja sceny

Proces konfiguracji sceny polega na identyfikacji (automatyczne lub ręczne wskazanie przez obsługę) punktów charakterystycznych istotnych elementów sceny. W pierwszym rzędzie mogą to być trwałe, płaskie elementy architektoniczne takie jak podłoga, ściany, drzwi i okna albo inne obiekty. Elementy sceny muszą się charakteryzować znanymi lub łatwymi do pozyskania wymiarami, co ułatwia proces konfiguracji i/lub weryfikacji konfiguracji sceny. Podczas prac opisywanych w niniejszym artykule przyjęto, że konfigurowane obszary są prostokątami.

Punkty płaskich obszarów widoczne w obrazie kamery można jednoznacznie określić w układzie współrzędnych związanych ze sceną pod warunkiem znajomości A , R i T . Do niwelacji perspektywy wystarczy jednak znajomość macierzy homografii H [16]. Zastosowanie transformacji odwrotnej z udziałem macierzy H pozwala zniwelować zniekształcenia wynikające z projekcji perspektywicznej (6) płaszczyzny elementu sceny na powierzchnię czujnika kamery z dokładnością do współczynnika skalującego z^{-1} . Punktom $[u,v]$ w układzie kamery można przyporządkować współrzędne w układzie związanym z wybraną płaszczyzną sceny $[X,Y]$ i odwrotnie.

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

gdzie:

H – macierz homografii (transformacji płaskiej),

r_1, r_2 – początkowe kolumny macierzy rotacji R ,

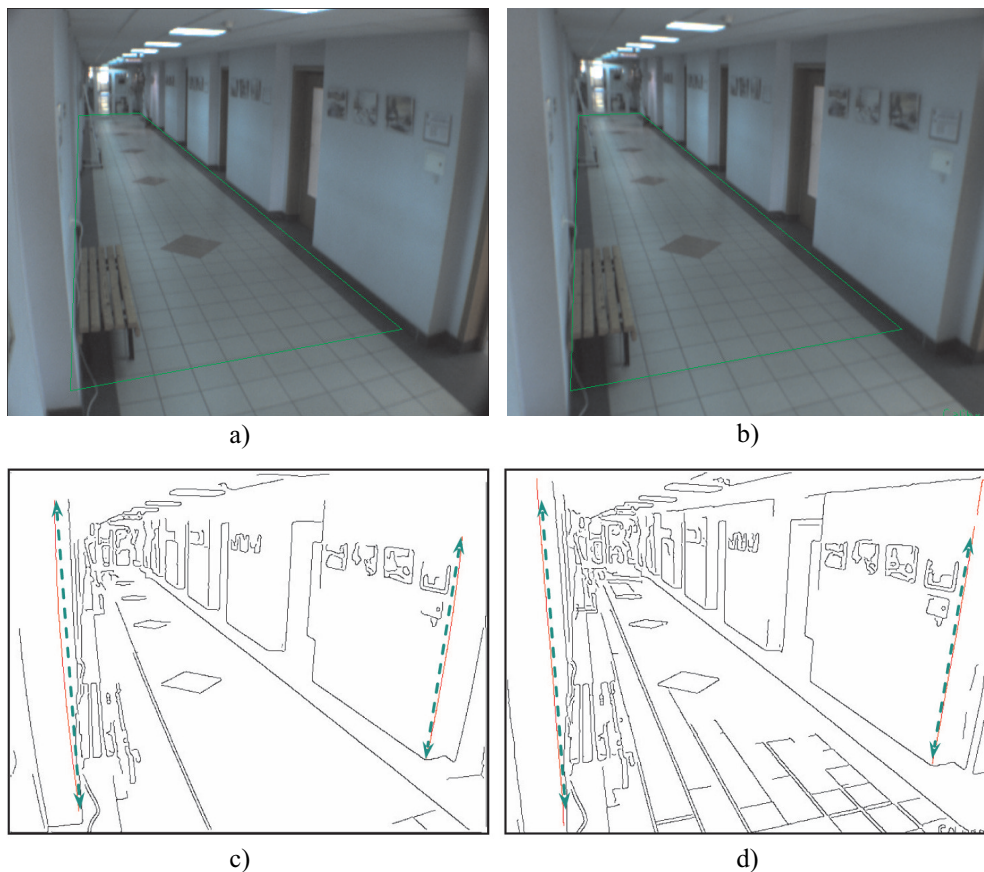
T – wektor translacji.

Konfiguracja elementu sceny polega na odnalezieniu macierzy H na podstawie znajomości czterech zwymiarowanych punktów należących do płaskiego elementu sceny oraz ich odpowiedników w obrazie kamery. Do rozwiązania układu równań względem H można użyć algorytmu dyskretnej transformaty liniowej [13, 14] lub jej modyfikacji [4].

W kontekście identyfikacji sceny należy również wspomnieć o algorytmie POS (*Pose from Orthography and Scaling*) oraz iteracyjnym rozszerzeniu POSIT [3], które pozwalają wyznaczyć zewnętrzne parametry kamery również na podstawie czterech punktów modelu przestrzennego. W przeciwieństwie do metody wyznaczania macierzy transformacji płaskiej H , punkty nie mogą leżeć na wspólnej płaszczyźnie. W publikacji [1] autorzy przedstawili podobny algorytm który pozwala na identyfikację orientacji na podstawie czterech punktów dla nieskalibrowanej kamery (macierz A czyli ogniskowa i punkt centralny nie są znane). Z kolei autor pracy [6] wykazał, że do wyznaczenia macierzy parametrów wewnętrznych kamery wystarczające są trzy widoki tej samej sceny. Warunkiem koniecznym dla tego sposobu identyfikacji sceny jest obecność dziewięciu linii prostych obecnych w każdym z trzech obrazów. Dopóki kamera jest nieruchoma a scena statyczna, ten sposób kalibracji wydaje się jednak mało przydatny.

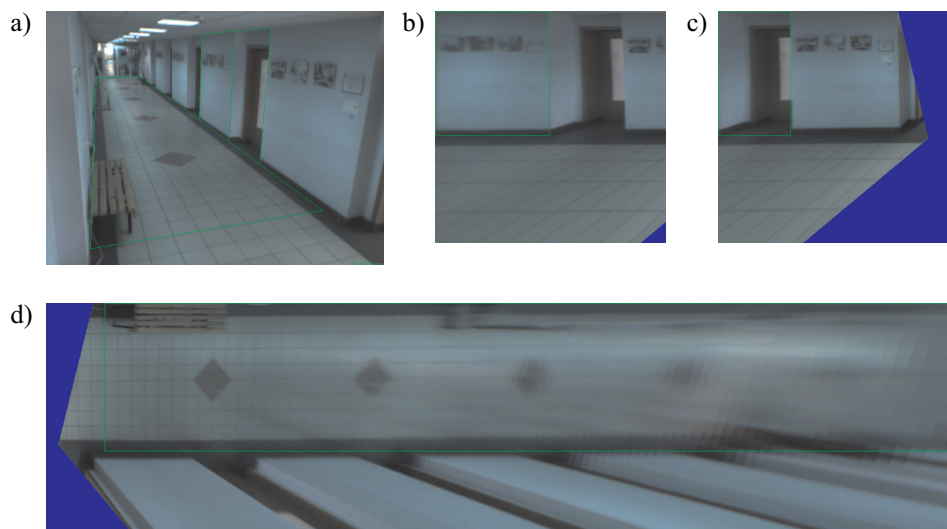
5. Niwelacja zniekształceń

Sposób niwelacji zniekształceń zależy od zamierzonego celu i możliwości platformy obliczeniowej. Jeśli np. stopień zniekształceń obiektu w znaczący sposób uniemożliwia przeprowadzenie wstępnego przetwarzania obrazu i jego analizy, wówczas należy wykonać korektę zniekształceń jako pierwszą operację przetwarzania wstępnego. Sytuacja taka może zachodzić, jeśli w torze analizy sygnału wizyjnego realizowany jest algorytm detekcji linii prostych za pomocą transformaty Hougha. Wówczas odcinki zamieniają się w łuki, których jednoznaczna detekcja jest utrudniona lub nawet niemożliwa. Rozwiązanie takie jest wymagające obliczeniowo ponieważ każdy piksel obrazu musi być przetworzony. Wyniki korekty całego obrazu pokazano na rysunku 2.

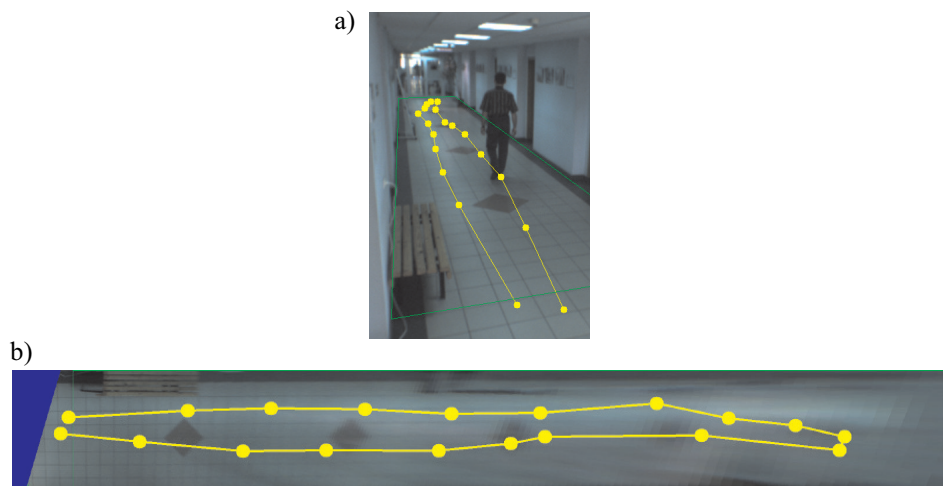


Rys. 2. Obraz obserwowanej sceny: a) obraz przed korekcją zniekształceń obiektywu; b) wynik korekty zniekształceń obiektywu (zielony wielokąt wyznacza obszar podłogi jako element sceny); c) zniekształcony widok krawędzi przed korekcją; d) widok krawędzi po korekcji (zielone linie wyznaczają proste odcinki, czerwonym kolorem oznaczono widoki krawędzi, krawędzie uzyskano metodą Canny'ego)

Uwagi te dotyczą również niwelacji efektu perspektywy dla elementów sceny przedstawionych na rysunku 3. W większości wypadków scena zawiera więcej niż element w postaci płaszczyzny. Zatem łączna powierzchnia wszystkich korygowanych płaszczyzn może przekraczać rozmiary ramki obrazu ze względu na normalizację rozdzielczości wynikowej pozwalającej zachować rzeczywiste proporcje elementów sceny. Aby przyspieszyć obliczenia, ewaluację współrzędnych pikseli zgodnie z zależnościami (2), (3), (4), (5) dla każdej ramki obrazu można zastąpić jednokrotnym wyznaczaniem współrzędnych w postaci tablicy LUT. Każdorazowo należy jednak przeprowadzić interpolację ze względu na zmianę treści obrazu. Zależnie od potrzeb i możliwości obliczeniowych może to być przybliżenie do najbliższego sąsiada interpolacja liniowa, kubiczna lub inna.



Rys. 3. Elementy sceny przed niwelacją perspektywy i po jej niwelacji z zachowaniem proporcji wymiarów: a) obraz po korekcji zniekształceń obiektywu z oznaczonymi elementami sceny*; b) płaszczyzna ściany o rozmiarze 220×240 cm; c) płaszczyzna wnętrza drzwi o rozmiarze 140×240 cm; d) fragment posadzki o rozmiarze 286×1870 cm



Rys. 4. Rekonstrukcja trajektorii** ruchomego obiektu na płaskim elemencie sceny:
 a) trajektoria zniekształcona; b) trajektoria w rzeczywistym układzie współrzędnych

* Identyfikację sceny wykonano ręcznie na podstawie pomiarów gabarytów.

** Anotację punktów trajektorii wykonano ręcznie na sekwencji obrazów

Alternatywny sposób wykorzystania parametrów zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych kamery polega na ich zastosowaniu do punktów lub krawędzi wyznaczonych w obrazie zaburzonym. Najczęściej liczba analizowanych punktów jest znacząco mniejsza od liczby pikseli obrazu, a sam proces ich rektyfikacji jest znacznie krótszy. Przykładem takiego zastosowania jest rekonstrukcja trajektorii osób przemieszczających się po płaskiej posadzce, jak to pokazano na rysunku 4.

6. Podsumowanie

W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano kolorową kamerę z czujnikiem wizyjnym CCD o przekątnej matrycy sensora $\frac{1}{2}$ " i rozmiarze piksela $9,9 \times 9,9 \mu\text{m}$. Mozaika matrycy typu Bayer zorganizowana była w ramkę o rozmiarze 659×492 pikseli. Zastosowano obiektyw o średnicy 35,5 mm, ogniskowej zmiennej w zakresie 6–12 mm i jasności 1 : 1.4. Kalibrację przeprowadzano ze wzorcem kalibracyjnym w postaci dwóch różnokolorowych plansz umieszczonych na dłuższych przystających bokach prostopadłościanu. Plansze stanowią wydruk szachownicy o rozmiarze 7×9 pól (patrz rys. 1). Wykorzystana procedura detekcji wzorca wykrywa siatkę 6×8 punktów leżących na stykach wierzchołków prostokątów szachownicy (tzw. narożniki).

Tabela 1

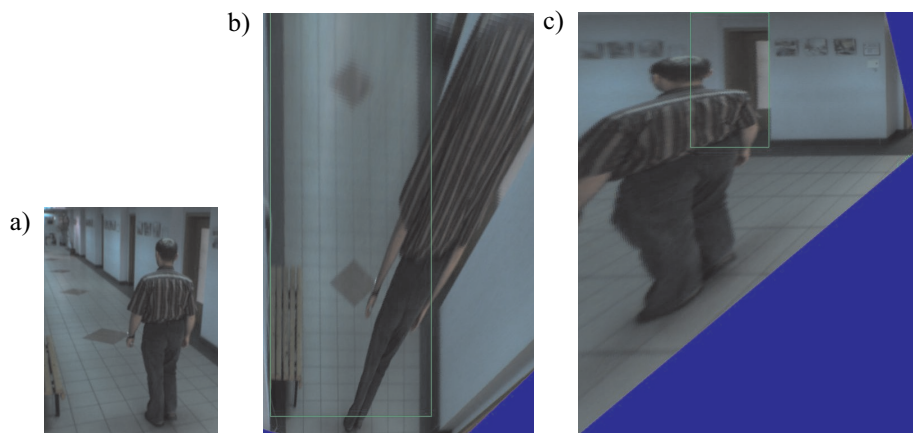
Wyniki kalibracji parametrów wewnętrznych kamery wyznaczone na podstawie czterech ekspozycji przestrzennego wzorca kalibracyjnego

f_n^* mm	f mm	r_1	r_2	p_1	p_2
12	11.40	6.59e-2	-6.47e-2	-9.22e-3	1.16e-3
6	5.75	-2.04e-1	5.89e-2	-2.98e-3	3.80e-3

* f_n – wartość nominalna ogniskowej, wynikająca z aktualnego powiększenia obiektywu

Test procedury kalibracji wykonano dla skrajnych ustawień ogniskowej obiektywu. Przyjęto, że ogniskowe są symetryczne zatem $f_x = f_y$. Uzyskane wartości ogniskowych odbiegały od nominalnych nie więcej niż 5%. Podczas kolejnych powtórzeń eksperymentu zaobserwowano dużą zmienność (do 10%) położenia punktu centralnego matrycy bez jednoznacznej tendencji przesunięcia w określonym kierunku. W dalszych próbach przyjęto zatem że punkt $[c_x, c_y]$ znajduje się w środku aktywnego obszaru matrycy czujnika wizyjnego. Pominięto również wyznaczanie współczynnika zniekształceń obiektywu k_3 . Przykładowe wartości parametrów wewnętrznych kamery przedstawiono w tabeli 1. Zamiana ogniskowej powoduje istotną zmianę charakteru zniekształceń, co znajduje potwierdzenie w środkowych kolumnach tabeli.

Zrekonstruowane obrazy na rysunkach 3 i 4 wskazują na wysoki stopień rozmycia obrazu w tych częściach sceny, które są bardziej oddalone od kamery. Jest to naturalny skutek interpolacji (w tym przypadku metodą najbliższego sąsiada) obrazu w tych obszarach i wynika z jednorodnej rozdzielczości czujnika. Należy zatem przyjąć, że wyniki detekcji punktów pozyskane z tych miejsc mają mniejszą dokładność przestrzenną w stosunku do elementów sceny, które znajdują się bliżej kamery. Kolejnym skutkiem negatywnym takiej niwelacji perspektywy jest zniekształcanie wszystkich obiektów, które pojawiają się w obszarze, a nie leżą na płaszczyźnie elementu sceny jak na rysunku 5. W przypadku gdy obraz wynikowy wykracza poza granice elementów sceny, w obrazie pojawiają się obszary, dla których w obrazie źródłowym nie ma danych. Oznaczono je kolorem niebieskim.



Rys. 5. Zniekształcenia obszarów nie leżących na płaszczyźnie sceny: a) obraz źródłowy z kamery; b) odtworzony obraz posadzki; c) odtworzony obraz wnętrza drzwi

Wymiarowanie sceny wykonano z wykorzystaniem dalmierza laserowego. W obliczeniach wykorzystano procedury biblioteki OpenCV w wersji 2.1 [17] uruchomione na komputerze wyposażonym w procesor Pentium T5600.

Literatura

- [1] Bujnak M., Kukulova Z., Pajdla T., *New efficient solution to the absolute pose problem for camera with unknown focal length and radial distortion*. Proc. of the 10th Asian Conference on Computer Vision, vol. 1, Springer-Verlag, Berlin, 2010, 11–24.
- [2] Cyganek B., *Komputerowe przetwarzanie obrazów trójwymiarowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
- [3] DeMenthon D., Davis L., *Model-based object pose in 25 lines of code*. International Journal of Computer Vision, Springer, vol. 15(1), 1995, 123–141.
- [4] Fuksa S., Byrski W., *Czteropunktowa metoda identyfikacji transformacji stereowizyjnej*. Automatyka (półrocznik AGH) 9, 3, 2005, 533–541.

- [5] Faugeras O., *Three-Dimensional Computer Vision*. MIT Press, England, 1996.
- [6] Hartley R., *Camera Calibration Using Line Correspondences*. Proc. DARPA Image Understanding Workshop, 1993, 361–366.
- [7] Lowe, D., *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. International Journal of Computer Vision, 60, 2, 2004, 91–110.
- [8] Lucas B., Kanade T., *An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision*. IJCAI'81, 674–679.
- [9] Micusik B., Pajdla T., *Simultaneous surveillance camera calibration and foot-head homology estimation from human detections*. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010, 1562–1569.
- [10] Qiang M., Xiling L., *Camera Auto-Calibration Based on Motion Detection for Airborne Traffic Surveillance*. International Conference on Computer Technology and Development, ICCTD '09, vol. 2, 2009, 350–354.
- [11] Stauffer C., Grimson W., *Adaptive background mixture models for real-time tracking*. Vol 2, IEEE, USA, 1999, 246–252.
- [12] Tadeusiewicz R., Ogiela M.R., Szczepaniak P.S., *Notes on a Linguistic Description as The Basis for Automatic Image Understanding*. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 19, No. 1, 2009, 143–150.
- [13] Teramoto H., Xu G., *Camera calibration by a single image of balls: From conics to the absolute conic*. Proc. of 5th Asian Conference on Computer Vision, 2002, 499–506.
- [14] Tsai R., *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, No. 4, August 1987, 323–344.
- [15] Wang J., Liu Y., *Characteristic Line of Planar Homography Matrix and Its Applications in Camera Calibration*. 2006. 18th International Conference on Pattern Recognition, vol. 1, IEEE, 2006, 147–150.
- [16] Zhang Z., *A flexible new technique for camera calibration*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22(11), 2000, 1330–1334.
- [17] <http://opencv.willowgarage.com/wiki/FullOpenCVWiki>, czas dostępu 17.05.2011.