

KALIBRACJA KAMER Z ZASTOSOWANYM WARUNKIEM SCHEIMPFLUGA¹

CAMERA CALIBRATION WITH SCHEIMPFLUG CONDITION

Regina Tokarczyk¹, Marzena Jędrzejek²

¹ Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,

Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie

² Absolwentka Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: fotogrametria bliskiego zasięgu, kalibracja kamery, warunek Scheimpfluga, dystorsja obiektywu

STRESZCZENIE: Zastosowanie warunku Scheimpfluga w kamerach powoduje, że dystorsja obiektywu nie jest symetryczna wokół punktu głównego zdjęcia, a przyjęcie tego punktu jako początku promieni radialnych dla dystorsji powoduje znaczące obniżenie dokładności fotogrametrycznego pomiaru. Dodatkowo, zmienia się charakter dystorsji, jej zniekształcenie nie jest kołowe, a eliptyczne. Dotychczasowe rozwiązania problemu polegają na dodaniu do parametrów kalibracji kamery kąta nachylenia płaszczyzny rejestracji w stosunku do płaszczyzn głównych obiektywu kamery i wyznaczenie ich w procesie wyrównania sieci z samokalibracją. W przypadkach stosowania metod jedno-obrazowych, wykorzystywanych na przykład w pomiarach z zastosowaniem profili świetlnych, znajomość parametrów kalibracji można ograniczyć tylko do błędów obrazu – przede wszystkim do wpływu dystorsji obiektywu. W pracy podano proste obliczeniowo metody wyznaczenia błędów obrazu dla zdjęć wykonanych kamerą z warunkiem Scheimpfluga. Pierwszy polega na wyznaczeniu wyinterpolowanych poprawek do pomierzonych współrzędnych w oparciu o „mapę” odchyłek otrzymaną na podstawie przekształcenia rzutowego płaskiego wielopunktowego pola testowego na zdjęcie. Druga metoda wymaga obliczenia oprócz parametrów dystorsji również punktu najlepszej symetrii dystorsji wykorzystując odchyłki po transformacji rzutowej. Badania wykonano w oparciu o dane rzeczywiste, jak i symulacyjne. Rezultaty usunięcia wpływu dystorsji pierwszą z metod okazały się znacznie lepsze od drugiej metody, pozwoliły na zmniejszenie wpływu błędu dystorsji do poziomu błędów przypadkowych pomiaru.

1. WSTĘP

Automatyczne procesy nadzoru produkcji z użyciem kamer cyfrowych wymagają często użycia warunku Scheimpfluga (znanego również pod nazwą warunku Czapskiego). Jest

¹ W opracowaniu wykorzystano pracę dyplomową Marzeny Jędrzejek i Małgorzaty Łackiej „Wykorzystanie wzorców świetlnych i metod fotogrametrycznych do pozycjonowania ciała ludzkiego”, pisaną pod kierunkiem Reginy Tokarczyk i obronioną na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie w 2010 roku

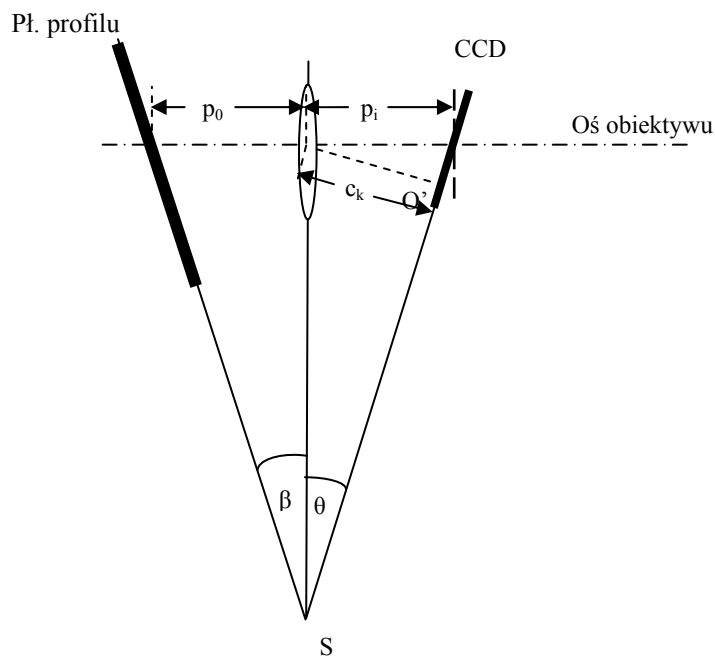
to przypadek dość powszechny przy rejestracji profili światła laserowego. Warunek Scheimpfluga stosuje się tu dlatego, że najczęściej nie da się usytuować płaszczyzny rejestracji równoległe do płaszczyzny profilu laserowego, a stosowanie dużego otworu przysłony wymuszone przez słabe oświetlenie i małą odległość fotografowania powodują, że głębina ostrości jest niewystarczająca. Ustawienie trzech płaszczyzn: głównej obiektywu, obrazu i profilu pod kątem tak, aby przecinały się w jednej krawędzi powoduje, że oś obiektywu przebija płaszczyznę obrazu w punkcie odległym od punktu głównego zdjęcia, który przy rozwiązaniach analitycznych sieci fotogrametrycznych przez samokalibrację wykorzystywanych w kalibracji przyjmowany jest zwykle jako punkt najlepszej symetrii dystorsji.

Wzajemne odpowiednie ustawienie płaszczyzn: przedmiotu i rejestracji obrazu względem płaszczyzn głównych obiektywu (Rys. 1) gwarantuje spełnienie równania soczewki (1):

$$\frac{1}{p_i} + \frac{1}{p_o} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

a zależność między kątami θ i β wyraża wzór (2):

$$\theta = \arctg\left(\frac{p_i}{p_o} \operatorname{tg}\beta\right) \quad (2)$$



Rys. 1. Realizacja warunku Scheimpfluga

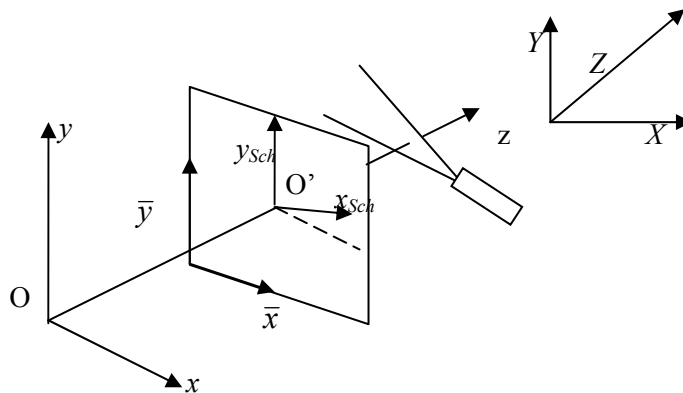
Warunek Scheimpfluga powoduje, że dystorsja obiektywu nie jest symetryczna wokół punktu głównego zdjęcia, a przyjęcie tego punktu jako początku promieni radialnych dla dystorsji powoduje znaczące obniżenie dokładności fotogrametrycznego pomiaru. Dodatkowo, ponieważ stożek deformowanych dystorsją promieni nie jest przecinany płaszczyzną tłową prostopadłą do osi obiektywu, na płaszczyźnie rejestracji linie tej samej wartości dystorsji będą elipsami, a nie okręgami.

2. WYKORZYSTANIE METOD WYRÓWNIANIA SIECI ZDJĘĆ DO KALIBRACJI KAMERY Z WARUNKIEM SCHEIMPFLUGA

Literatura poświęcona kalibracji kamer z warunkiem Scheimpfluga obejmuje niewiele pozycji. W kalibracji wykorzystuje się wyrównanie sieci zdjęć z samokalibracją, oparte na równaniu kolinearności lub wykorzystujące uproszczenie ich do równań DLT.

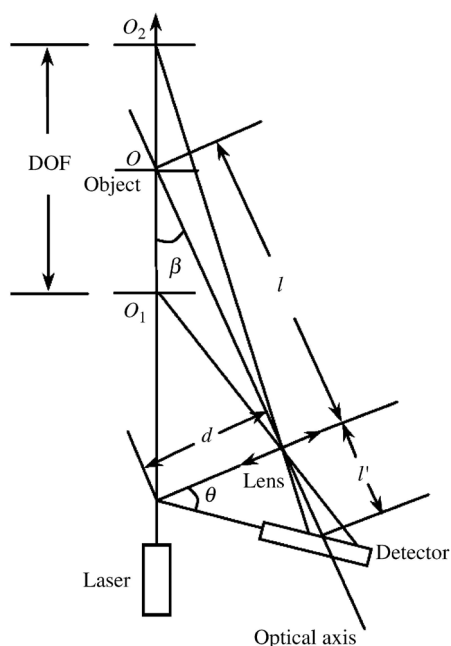
W samokalibracji opartej na warunku kolinearności (Louhichi *et al.*, 2006), (Fournel *et al.*, 2006), (Louhichi *et al.*, 2007) współrzędne tłowe zdjęcia w płaszczyźnie rejestracji prostopadłej do osi kamery uzyskuje się poprzez dodatkową rotację rzeczywistych współrzędnych tłowych zdjęcia z warunkiem Scheimpfluga o nieznany kąt θ (Rys. 1). W ten sposób równania kolinearności zawierają dodatkową niewiadomą. Obrót zdjęcia pochyłego do położenia normalnego do osi obiektywu pozwala na wprowadzenie do równań parametrów wielomianu dystorsji. Zatem równania obserwacyjne zawierają jako niewiadome:

$X_0^k, Y_0^k, Z_0^k, \omega^k, \phi^k, \kappa^k$ – elementy orientacji zewnętrznej k -tego zdjęcia,
 θ, x_0, y_0, c_k – elementy orientacji wewnętrznej kamery z warunkiem Scheimpfluga,



Rys. 2. Nachylenie płaszczyzny rejestracji w kamerze z warunkiem Scheimpfluga (Jangfeng *et al.*, 2007)

$K_1, K_2, \dots, P_1, P_2$ – współczynniki wielomianu dystorsji,
 X, Y, Z – współrzędne punktów obiektu w układzie odniesienia.

Rys. 3. Realizacja warunku Scheimpfluga (Jangfeng *et al.*, 2007)

Podobne założenie kąta odchylenia płaszczyzny rejestracji występuje w metodzie z wykorzystaniem przekształcenia do postaci DLT (Jangfeng *et al.*, 2007).

Na rysunku 2 pokazano wzajemne położenie układów współrzędnych: odniesienia (X, Y, Z) , tłowych kamery z wprowadzonym warunkiem Scheimpfluga (x_{Sch}, y_{Sch}) , tłowych zdjęcia równoległego do płaszczyzny lasera (x, y) , obrazu (\bar{x}, \bar{y}) . W celu ujednoczenia oznaczeń w tej pracy, zmieniono je w stosunku do artykułu źródłowego.

Przyjmując oznaczenia kątów θ i β jak na rysunku 3, oraz konfigurację układów jak na rysunku 2, zależność pomiędzy współrzędnymi układu równoległego do płaszczyzny cięcia światłem lasera a pochyloną o θ płaszczyzną rejestracji oddaloną o f od środka rzutów wyraża się wzorami (3) (Janfeng *et al.*, 2007):

$$x_{Sch} = \frac{f \cdot x \cos \theta}{z \cos \theta + y \sin \theta}, \quad y_{Sch} = \frac{f \cdot y}{z \cos \theta + y \sin \theta} \quad (3)$$

Przejdźcie ze współrzędnych tłowych na obrazowe z uwzględnieniem rozmiaru detektora dx i dy :

$$\bar{x} = \frac{x_{Sch}}{dx} + x_0, \quad \bar{y} = \frac{y_{Sch}}{dy} + y_0 \quad (4)$$

Czyli:

$$\bar{x} = \frac{f_x \cdot x \cos \theta}{z \cos \theta + y \sin \theta} + x_0, \quad \bar{y} = \frac{f_y \cdot y}{z \cos \theta + y \sin \theta} + y_0 \quad (5)$$

gdzie:

$$f_x = f / dx, \quad f_y = f / dy \quad (6)$$

Równania kolinearności wektora we współrzędnych dostosowania X, Y, Z i wektora we współrzędnych obrazu \bar{x}, \bar{y} zawierają elementy orientacji zewnętrznej zdjęcia, wewnętrznej x_0, y_0, f_x, f_y i po przekształceniach mogą być przedstawione jako równania DLT. Wprowadzając poprawki ze względu na dystorsję do współrzędnych obrazu \bar{x} i \bar{y} oraz oznaczając obarczone nią współrzędne \bar{x}_d i \bar{y}_d dostajemy równania obserwacyjne:

$$\begin{aligned} v_x &= \bar{x}_d - \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ v_y &= \bar{y}_d - \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

Gdzie:

$$\bar{x}_d = \bar{x} + \hat{\alpha}x$$

$$\bar{y}_d = \bar{y} + \hat{\alpha}y$$

\bar{x}, \bar{y} – idealne współrzędne obrazu, pozbawione wpływu błędów,

L_1, \dots, L_{11} – współczynniki DLT,

X, Y, Z – współrzędne fotopunktów w układzie odniesienia,

$\hat{\alpha}x$ i $\hat{\alpha}y$ – poprawki ze względu na dystorsję aproksymowane nieliniowym modelem, zawierające współczynniki dystorsji radialnej: K_1, K_2, K_3 i tangencjalnej: P_1, P_2 .

Jak widać z równania (7), zależność między współrzędnymi 3D a współrzędnymi na zdjęciu wykonanym kamerą z warunkiem Scheimpfluga ma charakter rzutowy. Układ równań obserwacyjnych zawiera niewiadome: $L_1, L_2, \dots, L_{11}, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2$. Elementy orientacji wewnętrznej kamery wyznaczone są ze współczynników $L_1 \div L_{11}$.

3. PROPOZYCJA UPROSZCZONYCH METOD WYZNACZANIA DYSTORSJI OBIEKTYWU KAMER Z WARUNKIEM SCHEIMPFLUGA

Częstym przypadkiem zastosowania *light-sectioning* jest wykorzystanie zależności rzutowej 2D, jaka zachodzi między płaszczyzną zadawaną przez laser a płaszczyzną rejestracji powstałego profilu. Wykorzystuje się wtedy wzory na transformację rzutową 2D, wyznaczając współrzędne dostosowania X, Y w płaszczyźnie profilu na podstawie współrzędnych obrazowych \bar{x}, \bar{y} i współczynników transformacji znanych z kalibracji układu kamera-laser:

$$\begin{aligned} X &= \frac{L_1 \bar{x} + L_2 \bar{y} + L_3}{L_4 \bar{x} + L_5 \bar{y} + 1} \\ Y &= \frac{L_6 \bar{x} + L_7 \bar{y} + L_8}{L_4 \bar{x} + L_5 \bar{y} + 1} \end{aligned} \quad (8)$$

Kalibracja kamery ogranicza się tu do wyznaczenia błędów obrazu, z których najistotniejsza jest dystorsja obiektywu.

Najprostszym sposobem rozwiązania problemu jest wykonanie „mapy” odchyłek ze względu na występowanie dystorsji. Wychodzi się tu z założenia, że po transformacji rzutowej odpowiednio licznych punktów płaskiego wzorca na płaszczyznę rejestracji powstałe odchyłki spowodowane są tylko błędami obiektywu. Sporządzona mapa odchyłek pozwala na interpolację błędów w dowolnym punkcie zdjęcia i poprawienie jego współrzędnych.

Druga zaproponowana metoda polega na wyznaczeniu z odchyłek wielomianu dystorsji (Tokarczyk 1982) wraz z punktem najlepszej symetrii dystorsji zakładając, że elipsoidalność kształtu dystorsji radialnej rzutowanej na płaszczyznę pochylonego o kąt θ zdjęcia będzie dobrze aproksymowana przez składnik tangencjalny dystorsji.

$$\begin{aligned} v_x = \partial x &= K_1 r^2 (\bar{x} - x_s) + K_2 r^4 (\bar{x} - x_s) + \dots P_1 [r^2 + (\bar{x} - x_s)^2] + \\ &+ 2P_2 (\bar{x} - x_s)(\bar{y} - y_s) = \frac{\bar{L}_1 X + \bar{L}_2 Y + \bar{L}_3}{\bar{L}_4 X + \bar{L}_5 Y + 1} - \bar{x} \\ v_y = \partial y &= K_1 r^2 (\bar{y} - y_s) + K_2 r^4 (\bar{y} - y_s) + \dots P_2 [r^2 + (\bar{y} - y_s)^2] + \\ &+ 2P_1 (\bar{x} - x_s)(\bar{y} - y_s) = \frac{\bar{L}_6 X + \bar{L}_7 Y + \bar{L}_8}{\bar{L}_4 X + \bar{L}_5 Y + 1} - \bar{y} \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie: X, Y – współrzędne punktów dostosowania,

\bar{x}, \bar{y} – obserwowane współrzędne obrazowe,

x_s, y_s – punkt główny symetrii dystorsji,

$K_1, K_2, \dots, P_1, P_2$ – współczynniki wielomianu dystorsji radialnej i tangencjalnej,

$\bar{L}_1, \bar{L}_2, \dots, \bar{L}_8$ – współczynniki przekształcenia rzutowego wzorca na zdjęcie

Sprawdzenie pierwszej z metod wykonano na zdjęciu pola testowego wykonanego monochromatyczną kamerą cyfrową Basler z obiektywem 35 mm Schneider Kreuznach, o pochylonej matrycy o rozdzielczości 1280×1024 pikseli z zachowaniem warunku Scheimpfluga. Pole testowe przedstawiało szachownicę czarno-białych kwadratów o boku 1 cm, o współrzędnych naroży naniesionych z dokładnością około 10 μm . Do transformacji wzorca na obraz wykorzystano punkty w siatce co 2 cm. Obliczenie wykonano z użyciem narzędzia programu Aerosys.

Otrzymano następujące wyniki:

RMS odchyłek na punktach dostosowania (na zdjęciu):

RMS v_x – 0.46 pxl

RMS v_y – 0.46 pxl

Po wyznaczeniu odchyłek na każdym punkcie dostosowania, odchyłki dla pozostałych punktów siatki interpolowano metodą wielomianową z wagami zależnymi od odległości od punktów dostosowania (6).

$$v_{x_i} = \frac{\sum_{j=1}^n v_{x_j} \cdot d_{ij}^{-1}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}^{-1}} \quad v_{y_i} = \frac{\sum_{j=1}^n v_{y_j} \cdot d_{ij}^{-1}}{\sum_{j=1}^n d_{ij}^{-1}} \quad (10)$$

gdzie:

v_{x_i}, v_{y_i} – odchyłki dla x i y punktu i – kontrolnego,

v_{x_j}, v_{y_j} – odchyłki x i y punktu j – dostosowania,

d_{ij} – odległość między punktami ij .

Po wyinterpolowaniu odchyłek na punktach kontrolnych, poprawieniu współrzędnych i przerzutowaniu na zdjęcie płaszczyzny testu otrzymano odchyłki:

RMS v_x – 0.22 pxl

RMS v_y – 0.23 pxl

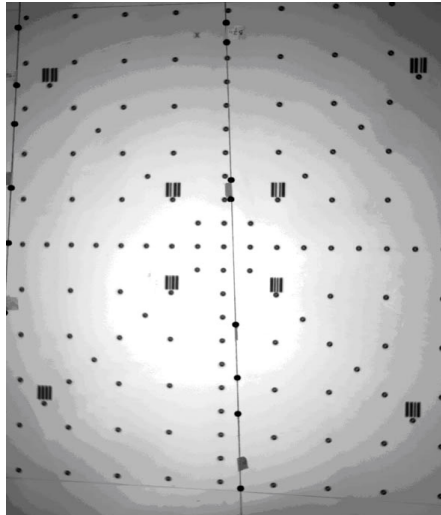
i odpowiednio stosując transformację odwrotną na płaszczyznę szachownicy – testu:

RMS V_x – 0.004 mm

RMS V_y – 0.006 mm

Wyniki tego testu niestety nie potwierdziły wyraźnie zasadności metody w tym konkretnym przypadku, ponieważ po transformacji rzutowej niewielkie odchyłki na zdjęciu spowodowane były raczej przypadkowymi błędami pomiaru, zatem dystorsja testowanego obiektywu była znikoma. Niemniej jednak uzyskano poprawę dokładności wpasowania na punktach kontrolnych na zdjęciu, natomiast na teście średniokwadratowe odchyłki są mniejsze niż dokładność określenia współrzędnych wzorcowych punktów.

Ponieważ obiektyw wykorzystany w testowanej kamerze miał mały błąd dystorsji, dla sprawdzenia zarówno jednej jak i drugiej metody wygenerowano fikcyjne zdjęcie z warunkiem Scheimpfluga. Współrzędne wzorcowe płaskiego pola testowego (tzw. małe pole AGH o 160 punktach, Rys. 4) zrzutowano na zdjęcie o znanych elementach orientacji, obarczono współrzędne tłowe błędem dystorsji oraz przypadkowymi błędami pomiaru o odchyleniu standardowym $\sigma=10 \mu\text{m}$, a następnie obliczono współrzędne obrazu na płaszczyźnie pochylonej o kąt θ w stosunku do płaszczyzny głównej obiektywu.



Rys. 4. Małe pole testowe AGH

W pierwszym etapie obliczeń sprawdzania metody interpolacyjnej wykonano transformację rzutową wzorca na zdjęcie dla 140 punktów dostosowania. Otrzymano odchyłki RMS spowodowane sumarycznym wpływem błędu systematycznego dystorsji i błędów przypadkowych:

$$\text{RMS } v_x = 0.040 \text{ mm}$$

$$\text{RMS } v_y = 0.041 \text{ mm}$$

Pozostałym 20 punktom pola wyinterpolowano odchyłki i poprawiono o nie współrzędne tłowe. Przed poprawieniem transformacja rzutowa wykonana za pomocą tych punktów dała średnie odchyłki:

$$\text{RMS } v_x = 0.035 \text{ mm}$$

$$\text{RMS } v_y = 0.036 \text{ mm}$$

po poprawieniu:

$$\text{RMS } v_x = 0.012 \text{ mm}$$

$$\text{RMS } v_y = 0.004 \text{ mm}$$

Zatem otrzymano zdecydowane podniesienie dokładności wyników, do poziomu wpływu błędów przypadkowych. W obliczeniach wykorzystano darmową wersję programu Aerosys oraz arkusz kalkulacyjny Excel.

Na tych samych fikcyjnych danych sprawdzono poprawność założeń drugiej metody – nazwanej metodą aproksymacyjną. Najpierw ułożono równania, w których obserwacje – odchyłki na punktach, aproksymowano wielomianem dystorsji (9). Niewiadomymi były tu parametry dystorsji oraz współrzędne punktu początkowego promienia dystorsji x_s i y_s . Obliczenia wykonano dla dwóch modeli dystorsji: pierwszy uwzględniał jeden współczynnik dystorsji radialnej wg modelu gaussowskiego i współczynniki dystorsji tangencjalnej, drugi – tylko dystorsję tangencjalną. Następnie poprawiono wszystkie punkty i powtórnie wykonano transformację wzorca na zdjęcie. W obliczeniach wykorzystano Aerosys, Matlab oraz arkusz kalkulacyjny.

Otrzymano dla modelu pierwszego dystorsji następujące wartości odchyłek średniokwadratowych:

$$\text{RMS } v_x = 0.032 \text{ mm}$$

$$\text{RMS } v_y = 0.032 \text{ mm}$$

Dla drugiego modelu dystorsji:

$$\text{RMS } v_x = 0.040 \text{ mm}$$

$$\text{RMS } v_y = 0.040 \text{ mm}$$

Wynika z obliczeń, że co prawda, metoda aproksymacyjna daje w przypadku pierwszego modelu dystorsji poprawę wyników o około 20%, ale jest to poprawa mało znacząca. Przez analogię do opisanej w poprzednim rozdziale metody kalibracji z wykorzystaniem DLT, otrzymane współczynniki modelu dystorsji należałoby uwzględnić w funkcji poprawiającej współrzędne tłowe zdjęcia prostopadłego do osi obiektywu, ale wymaga to znajomości kąta Scheimpfluga, który w tej metodzie nie jest możliwy do wyznaczenia.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Kalibracja kamer z warunkiem Scheimpfluga wymaga zastosowania niestandardowych algorytmów samokalibracji, co znacznie utrudnia proces jej prowadzenia. Tymczasem wiele z fotogrametrycznych aplikacji nie wymaga dla kamery znajomości jej elementów orientacji wewnętrznej, ponieważ często mierzony obiekt jest płaski, co pozwala na zastosowanie metod fotogrametrii jednoobrazowej. Kalibracja kamery może zatem ograniczyć się do wyznaczenia dystorsji obiektywu.

Najprostszą i zarazem efektywną metodą jest sporządzenie rozkładu odchyłek spowodowanych dystorsją, otrzymanych drogą przekształcenia rzutowego wzorca – gęstej siatki punktów na zdjęcie i obliczenie na ich podstawie wyinterpolowanych poprawek dla dowolnych punktów pomiarowych. Oczywiście należy pamiętać o tym, że pomiar kalibracyjny powinien być dokonany dla takiego samego ogniskowania, jak pomiar docelowy.

Obliczenie wpływu dystorsji modelowanej wielomianem zawierającym składniki radialne i tangencjalne na podstawie odchyłek po transformacji rzutowej 2D nie daje zadowalających wyników także i dla przypadku, kiedy uwzględnia się przeniesienie początku promienia radialnego z punktu głównego do punktu najlepszej symetrii dystorsji.

5. LITERATURA

Fournel T., Louhichi H., Barat C., Menudet J.F., 2006. Scheimpflug self-calibration based on tangency points. *Author manuscript, published in The 12th International Symposium on Flow Visualization*. Göttingen, Germany.

Jianfeng Li, Yongkang Guo, Jianhua Zhua, Xiangdi Lin, Yao Xin, Kailiang Duan, Qing Tang, 2007. *Optics and Lasers in Engineering*. 45 s.1077–1087. www.sciencedirect.com

Johannesson M., 2005. SIMD architectures for Range and Radar Imaging. *Linköping Studies in Science and Technology-Sweden*. Dissertations No. 399. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.1858&rep=rep1&type=pdf>

Louhichi H., Fournel T., Lavest J. M., Ben Aissia H. 2007. Self-calibration of Scheimpflug cameras: an easy protocol. *Measurement Science and Technology*, No 18 . s. 2616–2622.

Louhichi H., Fournel T., Lavest J. M., Ben Aissia H. 2006. “Camera self-calibration in Scheimpflug Condition for Air Flow Investigation”. G. Bebisetal. (Eds.) ISVC2006, LNCS4292, s.891–900. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Tokarczyk R., 1982. Badania nad możliwością wykorzystania aparatów fotograficznych do precyzyjnych pomiarów inżynierskich. *Rozprawa doktorska*. AGH Kraków.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych AGH nr 11.11.150.949.

CAMERA CALIBRATION WITH SCHEIMPFLUG CONDITION

KEY WORDS: close-range photogrammetry, camera calibration, Scheimpflug condition, lens distortion

Summary: Automatic processes of manufacturing supervision with digital cameras often need to employ the Scheimpflug condition. This is quite common when registering profiles with a laser light. The Scheimpflug condition is applied in this case because usually the registration plane cannot be set in parallel to the plane of a laser profile. Moreover, the low-light conditions forcing the use of large diaphragm size and low image acquisition distance imply that the depth of field is insufficient.

Setting up three planes: lens main, image and profile in a way that they intersect within one edge, causes that the axis of the lens impales image plane at a point distant from the principal point, which in the analytical evaluation of the photogrammetric networks is adopted as the best-distortion-symmetry point.

The Scheimpflug condition causes that the lens distortion (a feature significantly influencing the central projection) is not symmetrical around the principal point and, assuming this point as the origin of radial rays, leads to significant reduction of accuracy of measurement. A solution to this problem is to include the incidence angle between the detector array and lens main planes in the calibration parameters and their evaluation in the self-calibration network adjustment. This best solution from the substantive point of view thus needs elaboration of a specific software for self-calibration bundle adjustment, which is costly and time consuming. In this paper the different – computationally easier methods for the evaluation of image errors for the images taken considering the use of a camera with the Scheimpflug condition.

The first method involves determination of interpolated corrections to measured coordinates based on a “deviation map” obtained from the projective transform of a planar, multi-point test-field on the image. The second method employs the evaluation of the best-distortion-symmetry point using the deviations evaluated after the projective transform, approximated by a radial and tangential distortion polynomial evaluated regarding this point. The research was conducted using real as well as simulated data.

dr hab. inż. Regina Tokarczyk
e-mail: tokarcz@agh.edu.pl
telefon: 12 617 22 88

mgr inż. Marzena Jędrzejek
e-mail: marzena.jedrzejek@gmail.com