

Kalibracja systemów stereowizyjnych przy użyciu odpornej metody podwójnej płaszczyzny

Paweł Rotter, Witold Byrski, Michał Dajda

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki

Streszczenie: W metodzie podwójnej płaszczyzny (ang. *double plane*) zależność między współrzędnymi obrazowymi a współrzędnymi w przestrzeni trójwymiarowej jest obliczana na podstawie czterech przekształceń płaszczyzny na płaszczyznę (dwie kamery i dwie płaszczyzny kalibracyjne). Metoda jest intuicyjna i łatwa w implementacji, lecz ma poważną wadę w postaci złego uwarunkowania zadania dla pewnych obszarów przestrzeni. W artykule proponujemy odporną metodę kalibracji, która wykorzystuje dodatkowo trzecią płaszczyznę kalibracyjną. Jest to płaszczyzna wirtualna, która nie jest fizycznie elementem wzorca, ale jest zdefiniowana przez odpowiednio rozmieszczone punkty kalibracyjne na dwóch płaszczyznach podstawowych. Proponowany algorytm wykorzystuje liniową kombinację trzech par płaszczyzn: dla par płaszczyzn, które mogą generować błędy numeryczne przypisywana jest niska waga, minimalizująca ich wpływ na wynik końcowy. Eksperymenty wykazały dużą dokładność i wiarygodność proponowanej metody w stosunku do podstawowej wersji algorytmu: błąd średniokwadratowy i błąd maksymalny zostały zredukowane odpowiednio 4- i 20-krotnie.

Słowa kluczowe: stereowizja, kalibracja kamer, metoda podwójnej płaszczyzny

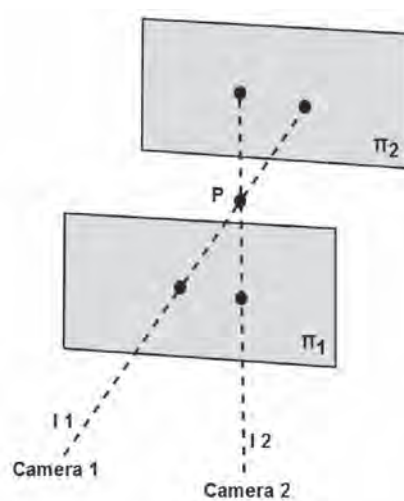
1. Wprowadzenie

Kalibracja systemu stereowizyjnego to proces odnajdywania zależności między współrzędnymi punktów 3-wymiarowej przestrzeni i współrzędnymi odpowiadających im punktów na 2-wymiarowych obrazach z kamer. Parametry transformacji stereowizyjnej określającej wspomniane powiązania agregują zarówno wewnętrzne parametry kamer (np. ogniskową obiektywu), jak i parametry zewnętrzne związane z położeniem kamer w globalnym układzie współrzędnych.

Kalibracja systemu stereowizyjnego jest zwykle przeprowadzana z wykorzystaniem wzorca kalibracyjnego, który jest 3-wymiarowym obiektem o znanym kształcie. Każdy punkt wzorca kalibracyjnego generuje dwa równania, stąd wzorec zawierający co najmniej 6 punktów pozwala na wyznaczenie 11 parametrów transformacji stereowizyjnej. Zazwyczaj wykorzystywana jest do tego metoda SVD [2, 4].

Zaproponowany przez nas algorytm odnosi się do metody podwójnej płaszczyzny (*double-plane method*)¹ polegającej na dekompozycji problemu na dwa przekształcenia rzutowe 2-wymiarowych płaszczyzn na płaszczyznę obrazów. W oryginalnej metodzie podwójnej płaszczyzny [3, 9] wzorec kalibracyjny zawiera dwa zestawy punktów umiejscowionych na

dwóch równoległych płaszczyznach. Minimalna liczba punktów na każdej z płaszczyzn to 4, co daje łącznie co najmniej 8 punktów. Współrzędne punktu M w przestrzeni 3-wymiarowej obserwowanej przez 2 kamery mogą być obliczone jako punkt przecięcia dwóch linii (rys. 1).



Rys. 1. Metoda podwójnej płaszczyzny dla przypadku z równoległymi płaszczyznami

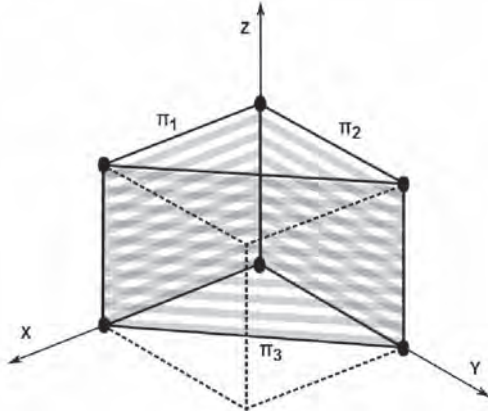
Fig. 1. Double plane method with parallel control planes

Zastosowanie jako wzorca kalibracyjnego dwóch płaszczyzn zamiast obiektu 3-wymiarowego, ma pewne zalety. Zadanie identyfikacji zostaje zdekomponowane na dwa zadania o mniejszym stopniu złożoności. Ponadto geometryczna interpretacja metody jest znacznie bardziej intuicyjna.

Należy jednak zauważyć, że w praktycznych aplikacjach często dużo wygodniej jest użyć wzorca kalibracyjnego zbudowanego z dwóch prostopadłych płaszczyzn. Taki obiekt łatwo jest zarówno skonstruować, jak i umieścić w obserwowanej scenie, np. na ścianie lub stole. Wzorec złożony z dwóch równoległych płaszczyzn jest trudniejszy do skonstruowania, a przez możliwość częściowego przesłaniania widoku jednej płaszczyzny przez drugą również mniej praktyczny. Jeżeli wzorec o prostopadłych płaszczyznach zostałby użyty w metodzie podwójnej płaszczyzny, jego kształt byłby taki sam jak w metodzie klasycznej, a minimalna liczba punktów zostałaby zredukowana z 8 do 6, ponieważ dwa punkty mogą być wspólne dla obu płaszczyzn. Niestety, taka konstrukcja wzorca powoduje złe uwarunkowanie problemu rekonstrukcji przestrzeni 3-wymiarowej dla pewnych obszarów. Współrzędne punktów widzianych przez którąkolwiek z kamer na tle linii przecięcia płaszczyzn wzorca nie mogą zostać odtworzone w poprawny sposób.

¹ www.kwon3d.com/theory/dlt/doub.html

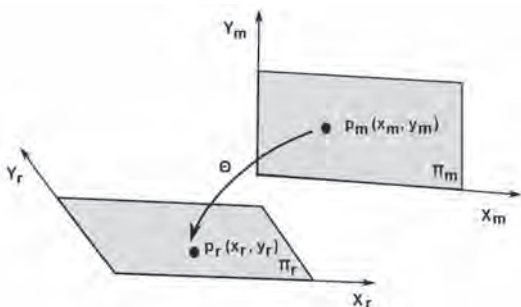
W artykule proponujemy metodę unikania błędów dla metody podwójnej płaszczyzny z prostokątnymi płaszczyznami. Błędy pojawiają się dla punktów widzianych przez co najmniej jedną kamerę na tle linii przecięcia płaszczyzn wzorca. W proponowanej metodzie wykorzystujemy zestaw 6 punktów kalibracyjnych umieszczonych na płaszczyznach Π_1 oraz Π_2 w taki sposób, że zdefiniowana może zostać dodatkowa płaszczyzna Π_3 bez zwiększania liczby punktów kalibracyjnych (rys. 2). Proponowany algorytm wykorzystuje do obliczeń kombinacje płaszczyzn Π_1 , Π_2 oraz Π_3 w celu zmniejszenia błędów wynikających z przybliżenia punktu przecięcia linii oraz zapewnienia ciągłości transformacji stereo.



Rys. 2. W proponowanej metodzie odpowiednie rozmieszczenie punktów kalibracyjnych na płaszczyznach Π_1 oraz Π_2 umożliwia zdefiniowanie dodatkowej płaszczyzny Π_3
Fig. 2. In our method location of the reference points at planes Π_1 and Π_2 facilitates calculation of the third plane Π_3

2. Rzut perspektywiczny płaszczyzny

Przekształcenie perspektywiczne płaszczyzny na płaszczyznę określane jest także jako homografia 2D (*2D homography, planar homography*); w języku polskim można spotkać określenie *transformata płaska*. Oznaczmy przez Π_r pewną płaszczyznę zawierającą dowolny układ współrzędnych (X_r, Y_r) oraz przez Π_m – płaszczyznę obrazu zawierającą układ współrzędnych (X_m, Y_m) (rys. 3). Transformację współrzędnych punktu $p_m(x_m, y_m)$ należącego do płaszczyzny Π_m na współrzędne jego rzutu $p_r(x_r, y_r)$ na płaszczyznę Π_r będziemy nazywać homografią dwuwymiarową i oznaczać Θ . W ogólnym przypadku układy współrzędnych (X_r, Y_r) oraz $(X_m,$



Rys. 3. Oznaczenia używane w opisie transformacji płaskiej
Fig. 3. Notation used in the description of 2D homography

$Y_m)$ nie muszą być ortogonalne i mogą mieć różne skale poszczególnych osi. Podane poniżej zależności są poprawne także w przypadku, gdy maczyca światłoczuła kamery nie jest prostokątna do jej osi optycznej. Uogólniając, transformacja Θ może uwzględniać superpozycję dowolnej liczby afinicznych przekształceń płaszczyzny na płaszczyznę.

$$x_r = \frac{a_1 x_m + b_1 y_m + c_1}{\alpha x_m + \beta y_m + 1}, \quad y_r = \frac{a_2 x_m + b_2 y_m + c_2}{\alpha x_m + \beta y_m + 1}$$

Transformacja Θ jest zdefiniowana następująco:

$$\begin{bmatrix} x_{r1} \\ y_{r1} \\ \vdots \\ x_{r4} \\ y_{r4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{m1} & y_{m1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{m1}x_{r1} & -y_{m1}x_{r1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{m1} & y_{m1} & 1 & -x_{m1}y_{r1} & -y_{m1}y_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m4} & y_{m4} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{m4}x_{r4} & -y_{m4}x_{r4} \\ 0 & 0 & 0 & x_{m4} & y_{m4} & 1 & -x_{m4}y_{r4} & -y_{m4}y_{r4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \\ a_2 \\ b_2 \\ c_2 \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

gdzie $[a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, \alpha, \beta]^T$, oznaczone dalej jako ρ , jest 8-elementowym wektorem parametrów transformacji Θ . Wektor ρ uwzględnia zarówno cechy układów współrzędnych (X_r, Y_r) i (X_m, Y_m) : kąt między osiami oraz skalowanie osi, jak i wzajemne położenia układów współrzędnych (X_r, Y_r) oraz (X_m, Y_m) . Oznacza to, iż Θ agreguje wszystkie cechy układu optycznego kamery, przy założeniu ich liniowości. Dodatkowe uwzględnienie zniekształceń nieliniowych, np. dystorsji, wymaga zastosowania odrębnego algorytmu, np. metody kompensacji zniekształceń radialnych [6, rozdział 2.1.4].

Kalibracja kamery polega na określeniu wektora ρ . W tym celu niezbędna jest znajomość współrzędnych 4 punktów: p_{m1}, \dots, p_{m4} należących do płaszczyzny Π_m oraz ich projekcji na płaszczyznę Π_r : p_{r1}, \dots, p_{r4} . Każda para punktów (p_{mi}, p_{ri}) generuje dwa równania liniowe. Wektor parametrów ρ może zostać wyznaczony na podstawie równania macierzewego:

Równanie ma dokładnie jedno rozwiązanie przy spełnieniu warunku iż żadne trzy punkty p_{r1}, \dots, p_{r4} nie są współliniowe. Uogólniając, jeśli dostępna jest liczba punktów $N > 4$, możliwe jest użycie $2N$ równań:

$$H = C\rho,$$

gdzie:

$$H = [x_{r1} \ y_{r1} \ \dots \ x_{rN} \ y_{rN}]^T$$

oraz

$$C = \begin{bmatrix} x_{m1} & y_{m1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{m1}x_{r1} & -y_{m1}x_{r1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{m1} & y_{m1} & 1 & -x_{m1}y_{r1} & -y_{m1}y_{r1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{mN} & y_{mN} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{mN}x_{rN} & -y_{mN}x_{rN} \\ 0 & 0 & 0 & x_{mN} & y_{mN} & 1 & -x_{mN}y_{rN} & -y_{mN}y_{rN} \end{bmatrix}$$

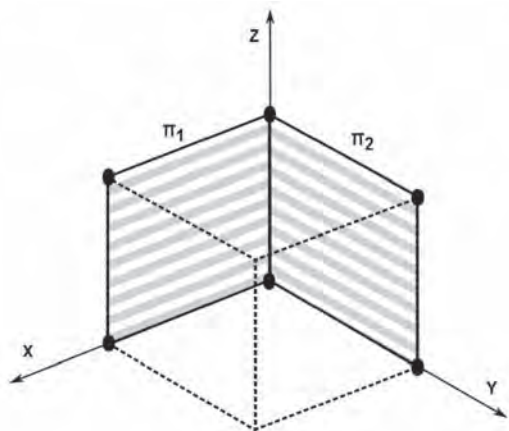
Rozwiązanie minimalno-normowe ma postać:

$$\rho = [C^T C]^{-1} C^T H.$$

3. Transformacja stereo

3.1. Algorytm bazowy: użycie dwóch prostokątnych płaszczyzn kalibracyjnych

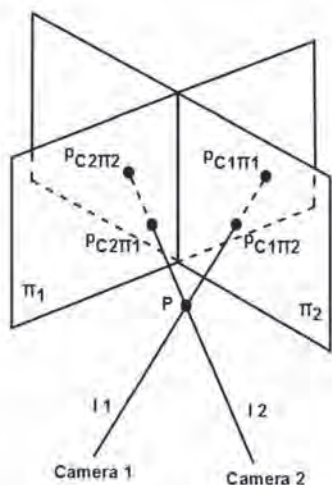
W podstawowej wersji algorytmu [5], system stereowizyjny jest kalibrowany z użyciem wzorca o dwóch płaszczyznach prostokątnych, każda określona przez 4 punkty. Dwa punkty mogą być wspólne dla obu płaszczyzn, stąd minimalna liczba niezbędnych punktów to 6 (np. 6 narożników sześciangu, jak na rys. 4).



Rys. 4. Przykład rozmieszczenia punktów kalibracyjnych na wzorcu

Fig. 4. An example of calibration points choice

W przykładzie (rys. 4) wybór płaszczyzn $\Pi_1=XZ$ oraz $\Pi_2=YZ$ upraszcza konwersje między lokalnymi układami współrzędnych (XZ i YZ) a układem globalnym XYZ . Kalibracja systemu polega na identyfikacji czterech transformacji płaskich, tzn. obliczeniu czterech wektorów parametrów $\rho(C_i, \Pi_j)$ wiążących kamerę C_i oraz płaszczyznę Π_j , gdzie $i, j \in \{1, 2\}$. Algorytm rekonstrukcji współrzędnych 3D prezentujemy poniżej. Wektory $p_{C1} = (x_{C1}, y_{C1})$ oraz $p_{C2} = (x_{C2}, y_{C2})$ to współrzędne rzutu tego samego punktu na obrazie z kamery 1 i 2.



Rys. 5. Rekonstrukcja przestrzeni trójwymiarowej w metodzie podwójnej płaszczyzny bazuje na czterech przekształceniach płaszczyzny na płaszczyznę

Fig. 5. Reconstruction of 3D space in double-plane method is based on four plane-to-plane projections

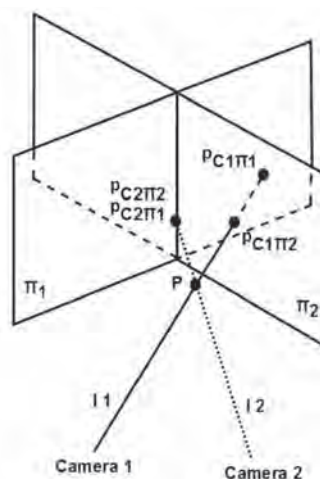
Algorytm 1. Bazowa metoda rekonstrukcji współrzędnych trójwymiarowych

- Krok 1. Obliczenie rzutów punktu P na płaszczyzny: Π_1 oraz Π_2 : $p_{C1\Pi1}, p_{C1\Pi2}, p_{C2\Pi1}, p_{C2\Pi2}$.
- Krok 2. Przekształcenie współrzędnych punktów: $p_{C1\Pi1}, p_{C1\Pi2}, p_{C2\Pi1}, p_{C2\Pi2}$ z lokalnych układów współrzędnych płaszczyzn Π_1 oraz Π_2 na globalny trójwymiarowy układ współrzędnych.
- Krok 3. Określenie dwóch prostych: prostej l_1 przechodzącej przez punkty $p_{C1\Pi1}$ i $p_{C1\Pi2}$ oraz prostej l_2 przechodzącej przez $p_{C2\Pi1}$ i $p_{C2\Pi2}$.
- Krok 4. Obliczenie punktu wspólnego prostych l_1 oraz l_2 : $p = l_1 \cap l_2$. W praktyce ze względu na dyskretyzację oraz ograniczoną precyzję proste l_1 oraz l_2 są bliskie przecięcia się ale zwykle nie mają punktu wspólnego, stąd punkt p jest wyznaczony jako połowa najkrótszego odcinka łączącego proste.

3.2. Zaproponowany algorytm: użycie wirtualnej płaszczyzny

W metodzie bazowej współrzędne punktu w przestrzeni są obliczane jako przecięcie dwóch prostych łączących kamery z rozważanym punktem. Linie definiowane są przez punkty $p_{C1\Pi1}, p_{C1\Pi2}, p_{C2\Pi1}, p_{C2\Pi2}$, jak pokazano w kroku 3. Jednakże, jeśli jedna z linii przecina obie płaszczyzny Π_1 oraz Π_2 w tym samym punkcie (leżącym na przecięciu płaszczyzn $\Pi_1 \cap \Pi_2$), dwa punkty mające w założeniu definiować prostą mają takie same współrzędne, przez co odtworzenie prostej nie jest możliwe (rys. 6). Ponadto, jeśli jedna z linii przechodzi blisko prostej przecięcia płaszczyzn, zadanie jest źle uwarunkowane, co prowadzi do błędów numerycznych.

Przy odpowiednim rozmieszczeniu punktów kalibracyjnych na płaszczyznach wzorca możliwe jest zdefiniowanie dodatkowej wirtualnej płaszczyzny Π_3 (por. rys. 2). Wykorzystanie trzech płaszczyzn pozwala na wyznaczenie współ-



Rys. 6. Odtworzenie współrzędnych punktu widzianego przez jedną z kamer na tle linii przecięcia płaszczyzn kalibracyjnych. Taka konfiguracja przestrzenna kamer, wzorca kalibracyjnego i punktu P nie pozwala na wyznaczenie prostej l2

Fig. 6. Reconstruction of coordinates for points which are seen by one of the cameras close to the intersection line of control planes. In case of this configuration line l2 can't be calculated

rzędnych przestrzennych dla każdego punktu przestrzeni, także leżącego na tle linii przecięcia dowolnych dwóch płaszczyzn wzorca, oraz na zmniejszenie błędów numerycznych. W fazie kalibracji obliczanych jest 6 wektorów $\rho(C_i, \Pi_j)$ wiążących 2 kamery z 3 płaszczyznami. Poniżej prezentujemy zmodyfikowany algorytm.

Algorytm 2. Algorytm rekonstrukcji przestrzeni trójwymiarowej z wykorzystaniem wirtualnej płaszczyzny kalibracyjnej

- Krok 1. Obliczenie projekcji punktu P na płaszczyzny: Π_1, Π_2 oraz Π_3 ; $P_{C1\Pi1}, P_{C1\Pi2}, P_{C1\Pi3}, P_{C2\Pi1}, P_{C2\Pi2}, P_{C2\Pi3}$.
- Krok 2. Przekształcenie współrzędnych punktów: $p_{C1\Pi1}, p_{C1\Pi2}, p_{C1\Pi3}, p_{C2\Pi1}, p_{C2\Pi2}, p_{C2\Pi3}$ z lokalnych układów współrzędnych płaszczyzn Π_1, Π_2 and Π_3 na globalny trójwymiarowy układ współrzędnych.
- Krok 3. Obliczenie odległości $d_{C_i\Pi_jk}$ między punktami definiującymi proste $p_{C_i\Pi_j}$ oraz $p_{C_i\Pi_k}$, gdzie $i \in \{1,2\}, j,k \in \{1,2,3\}, j \neq k$.
- Krok 4. Określenie prostych: $l_{C_i\Pi_jk} = (p_{C_i\Pi_j}, p_{C_i\Pi_k})$ gdzie $i \in \{1,2\}, j,k \in \{1,2,3\}, j \neq k$, jeśli $d_{C_i\Pi_jk}$ jest większe od 0. Jeżeli $d_{C_i\Pi_jk}$ wynosi 0 obliczenie prostej $l_{C_i\Pi_jk}$ nie jest możliwe i jest ona pomijana.
- Krok 5. Obliczenie punktów wspólnych dla możliwych par prostych: $p_{12} = l_{C1\Pi12} \cap l_{C2\Pi12}, p_{13} = l_{C1\Pi13} \cap l_{C2\Pi13}, p_{23} = l_{C1\Pi23} \cap l_{C2\Pi23}$ (z uwzględnieniem uwagi z kroku 4 algorytmu 1) oraz odpowiadających im wag w_{12}, w_{13}, w_{23} , gdzie w_{ij} jest pierwiastkiem z $\min\{d_{C1\Pi1j}, d_{C2\Pi1j}\}$.
- Krok 6. Obliczenie współrzędnych punktu finalnego jako średniej ważonej ze współrzędnych punktów p_{12}, p_{13}, p_{23} i wartości w_{12}, w_{13}, w_{23} jako wag.

4. Eksperymenty

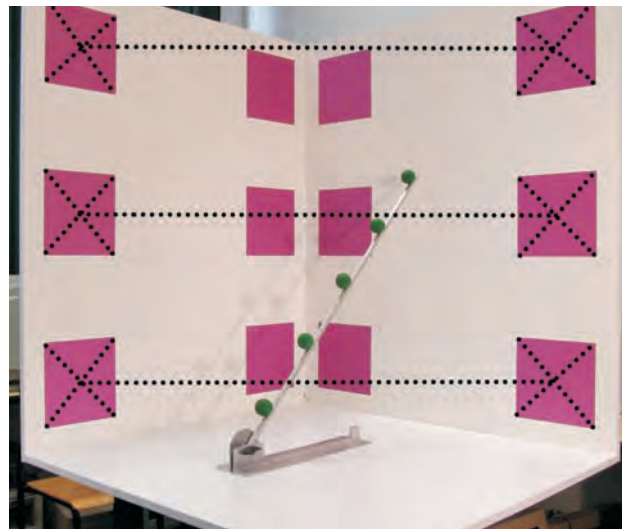
W celu sprawdzenia dokładności opracowanego algorytmu i jego porównania z algorytmem bazowym przeprowadziliśmy serię eksperymentów. Zbadaliśmy działanie algorytmu dla 162 punktów o znanym położeniu, rozmieszczonych w przestrzeni roboczej (sześcián 1 m x 1 m x 1 m, rys. 7).

Wykonaliśmy zdjęcia punktów w wysokiej rozdzielczości (2816x2112) dla 5 ustawień kamer co dało łącznie 810 punktów testowych. Dla każdego z punktów obliczyliśmy jego położenie przy użyciu obu opisanych algorytmów oraz błędy wyników (błąd rozumiany jest jako odległość między wyznaczonym a rzeczywistym położeniem punktu). Wybrane parametry statystyczne błędów przedstawiono w tab. 1.

Tab 1. Porównanie błędów uzyskiwanych dla algorytmu bazowego i zmodyfikowanego

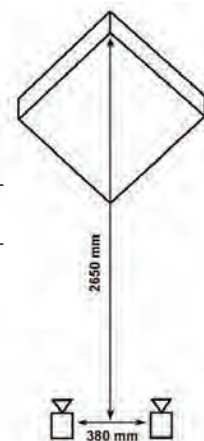
Tab. 1. Comparison of errors of the basic and improved algorithms

	Algorytm bazowy	Opracowany algorytm
Błąd maksymalny [mm]	2401	115
Błąd średni [mm]	49	26
Błąd średnio-kwadratowy [mm]	139	36
Mediana błędu [mm]	23	19



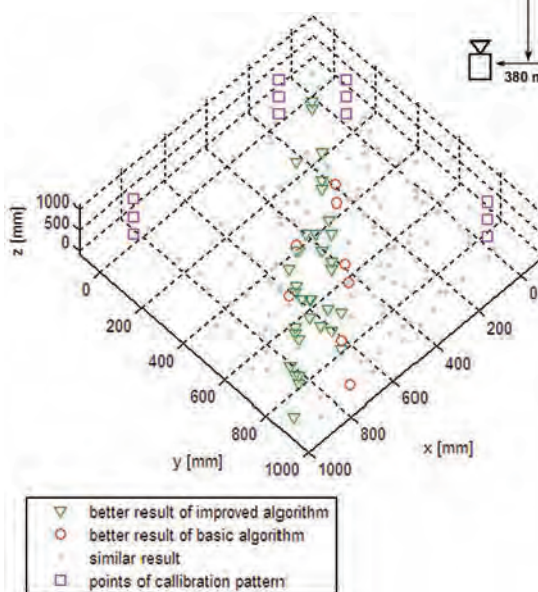
Rys. 7. Wzorec kalibracyjny oraz zestaw punktów kontrolnych. Linie przerywane przedstawiają położenie wirtualnej płaszczyzny Π_3

Fig. 7. Our calibration pattern and the set of control points. Dashed lines indicate location of the virtual plane Π_3



Rys. 8. Schemat ustawienia kamer dla wybranej serii testowej

Fig. 8. Scheme of cameras setup in chosen test series



Rys. 9. Rekonstrukcja sceny z zaznaczonymi wszystkimi punktami testowymi. Punkty, dla których różnica błędów uzyskanych dla obu algorytmów jest większa niż 10 mm zostały zaznaczone trójkątami i okręgami

Fig. 9. Reconstruction of the scene with marked all test point for chosen test series. Points with error difference between basic and improved algorithm bigger than 10 mm are marked as triangles or circles

Analiza wyników wskazuje, iż błąd średniokwadratowy został zmniejszony blisko 4-krotnie a błąd maksymalny blisko 20-krotnie, co jest rezultatem wyeliminowania sytuacji, w których złe uwarunkowanie problemu prowadziło do bardzo dużych błędów.

Aby przeanalizować zależności między położeniem punktów w przestrzeni oraz błędami wyników obu algorytmów skupimy się na jednej serii testowej. Położenie kamer oraz sceny dla wybranej serii prezentuje rys. 8. Zgodnie z oczekiwaniami błędne wyniki algorytmu bazowego pojawiały się dla punktów widzianych przez kamery w pobliżu przecięcia płaszczyzn, podczas gdy zaproponowany przez nas algorytm również w tych obszarach dawał rezultaty obciążone niewielkimi błędami. Zaobserwowane zostały przypadki, dla których algorytm bazowy zwracał nieznacznie lepszy wynik, nawet w pobliżu przecięcia płaszczyzn, co wynika z przypadkowości błędów. Parametry statystyczne dla wybranej serii prezentowane są w tab. 2.

Tab. 2. Porównanie błędów uzyskiwanych dla algorytmu bazowego i zmodyfikowanego w wybranej serii testowej

Tab. 2. Comparison of errors of basic and improvement algorithm for chosen test series

	Algorytm bazowy	Opracowany algorytm
Błąd maksymalny [mm]	2401	64
Błąd średni [mm]	59	26
Błąd średnio-kwadratowy [mm]	207	29
Mediana błędu [mm]	25	24

Zgodnie z oczekiwaniami zaproponowany algorytm okazał się zdecydowanie dokładniejszy od algorytmu bazowego dla punktów leżących w pobliżu linii łączących kamery z przecięciem płaszczyzn kalibracyjnych. W proponowanym przez nas algorytmie współrzędne punktu w przestrzeni obliczane są jako średnia ważona trzech punktów i w przypadku zaistnienia opisanej sytuacji odpowiedni dobór wag eliminuje ryzyko złego uwarunkowania problemu.

5. Podsumowanie

Metoda kalibracji systemu stereowizyjnego zaproponowana w artykule opiera się na transformacjach płaszczyzny na płaszczyznę przy wykorzystaniu wzorca o dwóch prostopadłych płaszczyznach. Punkty kalibracyjne są rozmieszczone na wzorcu w sposób umożliwiający zdefiniowanie trzeciej, wirtualnej płaszczyzny, wykorzystywanej w celu poprawy uwarunkowania zadania dla pewnych obszarów analizowanej sceny. Na podstawie ponad 800 punktów testowych przeanalizowane zostało działanie algorytmu bazowego oraz zaproponowanego w artykule. Maksymalny błąd występujący w algorytmie bazowym został zmniejszony ponad 20-krotnie, natomiast błąd średniokwadratowy blisko 4-krotnie. Proponowany przez nas algorytm jest intuicyjny i prosty w implementacji.

Bibliografia

1. Bhatti A. (ed.): *Stereo Vision* InTech 2008. [<http://intechweb.org/book.php?id=87>].
2. Cyganek B., Siebert J.P.: *An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms*, Wiley 2009.
3. Drenk V., Hildebrand F., Kindler M., Kliche D.: *A 3D video technique for analysis of swimming in a flume*, [in:] Sanders R.H., Gibson B.J. (eds.): *Scientific Proceedings of the XVII International Symposium on Biomechanics in Sports*, 361–364. Perth, Australia: Edith-Cowan University 1999.
4. Faugeras O.: *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, MIT Press, 1993.
5. Fuksa S., Byrski W.: *Czteropunktowa metoda identyfikacji transformacji stereowizyjnej (Four-point identification method of stereovision transformation)*, „Automatyka” 2005, Vol. 9, No. 3.
6. Klette R., Schluns K., Koschan A.: *Computer Vision: Three-Dimensional Data from Images*, Springer-Verlag, 1998.
7. Sturm P.F., Maybank S.J.: *On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications*, CVPR, vol. 1, 1432, 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'99) - Volume 1, 1999.
8. Trucco A.V.: *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall 1998.
9. Zhang Z.: *A flexible new technique for camera calibration*. IEEE Transactions on PAMI, Vol. 22, Issue 11, Nov 2000, 1330–1334.
10. Zhang Z.Y.: *Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations*, ICCV99 (666–673), 1999. IEEE DOI Link BibRef 9900. ■

Robust double-plane calibration of stereovision systems

Abstract: In double-plane method for stereovision system calibration the correspondence between screen coordinates and location in 3D space is calculated based on four plane-to-plane transformations: there are two planes of the calibration pattern and two cameras. The method is intuitive and easy to implement but the main disadvantage is ill-conditioning for some spatial locations. In this paper we proposed a robust method which exploits the third plane which physically does not belong to the calibration pattern but can be calculated from the set of reference points. Our algorithm uses combination of three calibration planes with weights which depend on screen coordinates of the point of interest: a pair of planes which could cause numerical errors receives small weight and has practically no influence on the final results. We analysed errors and their distribution in 3D space for basic and improved algorithm. Experiments demonstrate high accuracy and reliability of our method comparing to the basic version: mean square error and maximum error are reduced 4 times and 20 times respectively.

Keywords: stereovision, camera calibration, double-plane method

prof. dr hab.inż. Witold Byrski

Uzyskał stopień doktora habilitowanego w zakresie automatyki i robotyki w 1994 r., a Prezydent RP nadał mu tytuł naukowy profesora w 2009 r. Od 1998 r. pełni funkcję Zastępcy Kierownika Katedry Automatyki, na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH. Profesor wizytujący na uniwersytetach w Anglii, Dani, Holandii i Francji. Członek organizacji IEEE, Sekcji Informatyki i Automatyki KNT PAU, członek Sekcji Automatyki PAN, członek Polskiej Sekcji Sterowania i Systemów IEEE oraz Polskiej Sekcji Robotyki i Automatyki IEEE jak również dwóch Komitetów Technicznych IFAC (POLSPAR). Redaktor naukowy miesięcznika „Napędy i Sterowanie”. Odznaczony przez Prezydenta RP – KKOOP, ZKZ i ZMzDS oraz medalami KEN i AGH. Zakres zainteresowań badawczych to teoria i komputerowe systemy sterowania. W swojej działalności badawczej zajmuje się metodami dokładnego odtwarzania stanu przy pomocy obserwatorów całkowych i optymalnymi metodami identyfikacji ciągłych systemów dynamicznych z wykorzystaniem filtrów splotowych i funkcji modulujących. Ostatnie badania dotyczą metodologii przetwarzania obrazów przestrzennych i związanego z tym problemu niezawodnej kalibracji kamer. W dorobku ma ponad 90 recenzowanych publikacji, wliczając w to monografię na temat metod obserwacji oraz 100 innych opracowań naukowych.



e-mail: wby@ia.agh.edu.pl

dr inż. Paweł Rotter

Jest adiunktem w Katedrze Automatyki AGH, zajmuje się głównie komputerową analizą obrazu. Pracował m.in. w Laboratorium Sztucznej Inteligencji i Analizy Informacji na Uniwersytecie Arystotelesa w Salonikach (2001–2002) oraz we Wspólnotowym Centrum Badawczym (JRC – IPTS) w Sewilli (2005–2008), uczestnicząc w licznych międzynarodowych projektach badawczych. Był wykładowcą Smart University w Sophia Antipolis oraz ekspertem zewnętrznym Europejskiej Agencji ds. Bezpieczeństwa Sieci i Informacji (ENISA). Jest autorem publikacji m.in. w IEEE Pervasive Computing, Multimedia Tools and Applications, IEEE Technology and Society Magazine, rozdziałów w monografiach o zasięgu międzynarodowym oraz cyklu artykułów popularnonaukowych w hiszpańskim periodyku BIT.



e-mail: rotter@agh.edu.pl

mgr inż. Michał Dajda

W 2010 r. ukończył studia na kierunku Automatyka i Robotyka na Wydziale EAliE Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. W trakcie studiów aktywnie działał w Kole Naukowym Automatyków i Robotyków „Focus” przy Katedrze Automatyki. Obecnie pracuje w Centrum Elektroniki Stosowanej.

e-mail: michal.dajda@gmail.com

