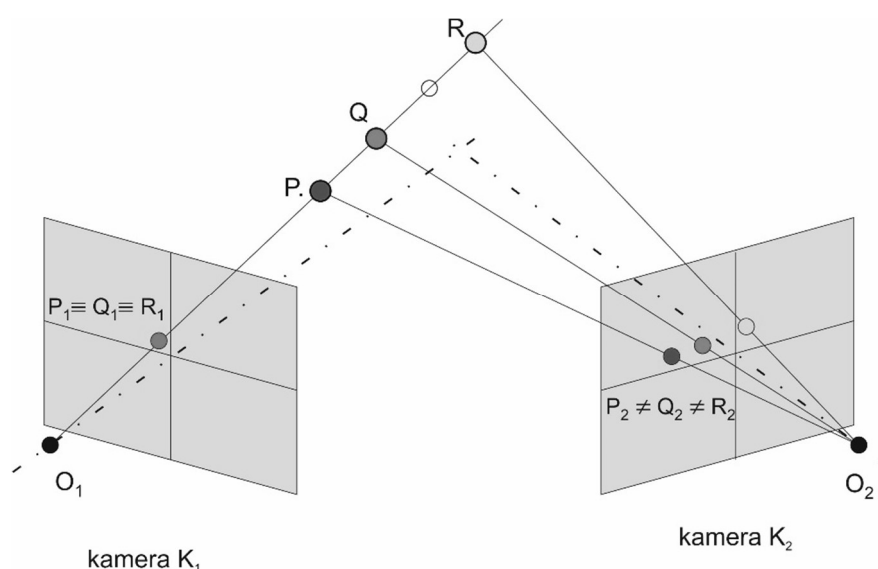


9

METODY STEREOWIZYJNE W ANALIZIE SKŁADU ZIARNOWEGO

9.1 WSTĘP

Najbardziej naturalnym – z punktu widzenia ludzkiego wzroku i umysłu – sposobem akwizycji obrazów trójwymiarowych jest widzenie stereoskopowe, czyli akwizycja i porównanie dwóch obrazów dwuwymiarowych tej samej sceny (zbioru obiektów) ale widzianych z co najmniej dwóch różnych punktów o określonej odległości pomiędzy nimi. Występująca u człowieka oraz większości zwierząt para oczu nie służy wyłącznie do zdublowania receptorów sygnałów wizyjnych ale przede wszystkim zapewnia zdolność do dostrzegania głębi obserwowanych scen [2]. Efekt ten zwany jest widzeniem stereoskopowym. Świat obserwowany jednym okiem jest płaski, a zdolność do postrzegania wzajemnego położenia obiektów w przestrzeni możliwa jest w takim przypadku jedynie dzięki analizie innych zjawisk – takich jak ich wzajemne przesłanianie. Obiekt, który jest przesłonięty przez inny musi znajdować się dalej od obserwatora. Pełnia odbioru głębi (nawet bez zjawiska przesłaniania) możliwa jest dopiero przy wykorzystaniu pary oczu (lub w rozwiązaniach technicznych – kamer).

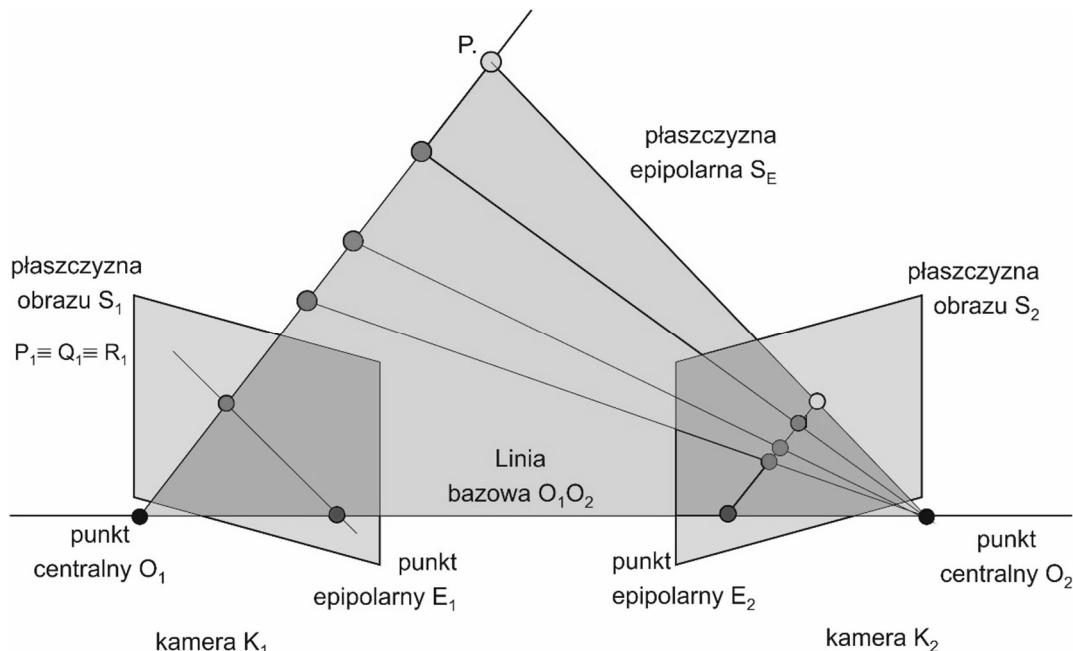


Rys. 9.1 Niejednoznaczność przestrzenna obrazu dwuwymiarowego w kamerze K1 i zasada wykorzystania drugiej kamery K2 do jednoznacznej oceny głębi

Konieczność stosowania co najmniej dwóch przetworników obrazu (oczu lub kamer) związana jest z niejednoznacznością obrazu dwuwymiarowego tzn. faktem, że określony punkt tego obrazu odpowiada całemu zbiorowi (linii) punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Stąd też niezbędne jest zastosowanie drugiej kamery (rys. 9.1), ujednoznaczniającej uzyskany obraz.

9.2 PODSTAWOWE ZASADY METODY STEREOWIZYJNEJ

Jeżeli płaszczyzny obrazów S_1 i S_2 z odpowiednimi punktami centralnymi rzutowania O_1 i O_2 przedstawionymi na rys. 9.2 modelują tzw. kamerę z obiektywem punktowym (odległość płaszczyzny S_i od punktu centralnego O_i oznacza ogniskową kamery K_i) to prostą O_1O_2 łączącą punkt centralny O_1 z punktem centralnym O_2 określa się mianem prostej bazowej (baseline)



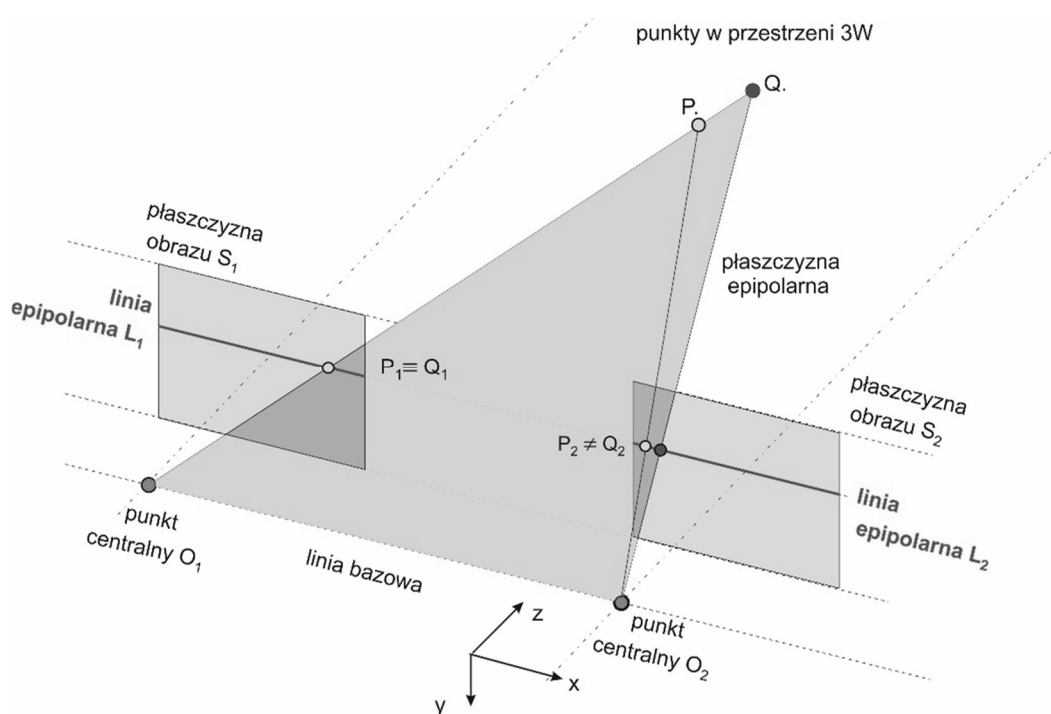
Rys. 9.2 Podstawowe pojęcia geometrii pary obrazów stereowizyjnych

Punkty przecięcia linii bazowej O_1O_2 z płaszczyznami obrazów S_1 i S_2 określa się mianem tzw. punktów epipolarnych E_1 i E_2 .

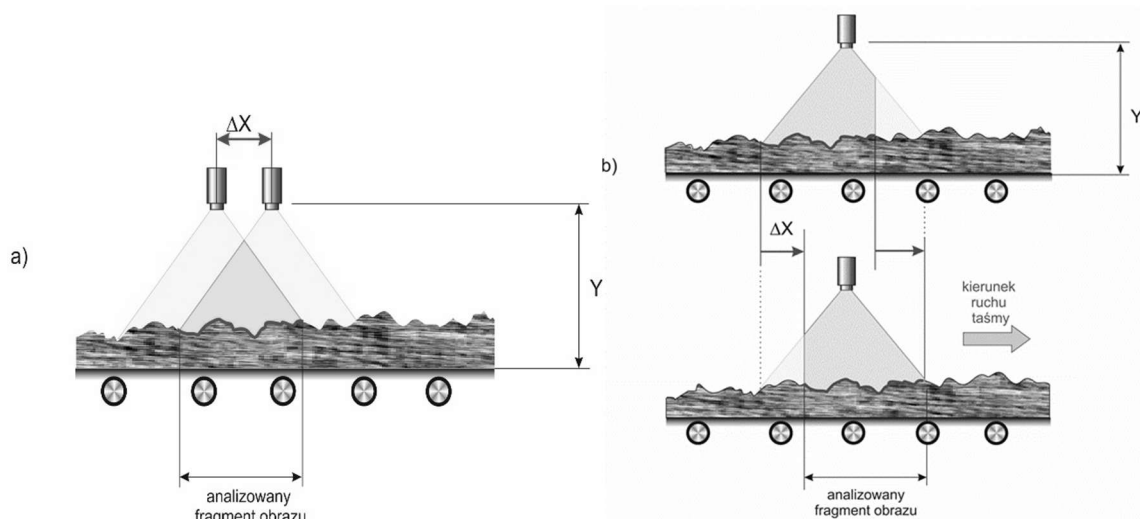
Dowolny punkt przestrzeni P wraz z punktami E_1 i E_2 tworzy trójkę punktów wyznaczających płaszczyznę PE_1E_2 nazywaną płaszczyzną epipolarną. Linie przecięcia płaszczyzny epipolarnej z płaszczyznami obrazów S_1 i S_2 nazywa się liniami epipolarnymi L_1 i L_2 . Linie te łączą obydwa obrazy punktu P (czyli P_1 i P_2) w obydwu kamerach z odpowiednimi punktami epipolarnymi E_1 i E_2 .

Powyższy opis jest dość złożony, jednak podlegać może istotnemu uproszczeniu w sytuacji, gdy osie optyczne obydwu (jednakowych – czyli o jednakowej ogniskowej i jednakowej rozdzielczości) kamer są do siebie równoległe, a obrazy S_1 i S_2 leżą w jednej płaszczyźnie. Wówczas linia bazowa O_1O_2 jest równoległa do płaszczyzn obrazów S_1 i S_2 , punkty epipolarne E_1 i E_2 dążą do

nieskończoności, a wszystkie linie epipolarne mają kierunek zgodny z kierunkiem skanowania matrycy obrazu (tzn. wierszy lub kolumn) co w istotny sposób ułatwia tworzenie i przyspiesza pracę algorytmów przetwarzania pary obrazów. Sytuację taką – istotną z punktu widzenia zastosowań w układach wizyjnej analizy materiałów ziarnistych transportowanych na taśmie przenośnika przedstawiono schematycznie na rys. 9.3 oraz 9.4.

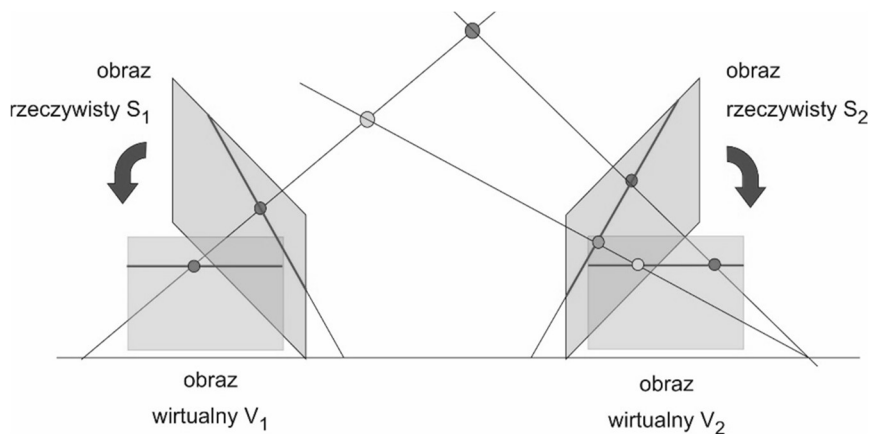


Rys. 9.3 Uproszczona geometria pary obrazów stereowizyjnych w przypadku równoległości osi optycznych i wspólnej płaszczyzny przetworników obrazu.



Rys. 9.4 Akwizycja obrazów stereowizyjnych materiału transportowanego na ruchomej taśmie przenośnika a) wykorzystanie dwóch odrębnych kamer, b) wykorzystanie pojedynczej kamery wykonującej zdjęcia w określonym odstępie czasu.

W przypadku jednostajnego ruchu strumienia materiału na taśmie przenośnika możliwe jest wykorzystanie tylko jednej kamery wykonującej zdjęcia w określonym odstępie czasu (rys. 9.4 b). Podobnie jak w przypadku układu (z rys. 9.4.a) transformacji do postaci obrazu trójwymiarowego może podlegać jedynie część wspólna obydwu obrazów dwuwymiarowych. Zbędny jest przy tym stosowany często proces tzw. rektyfikacji czyli wirtualnego sprowadzania dwóch obrazów rzeczywistych do wspólnej płaszczyzny (przedstawiony schematycznie na rys. 9.5.), realizowany zwykle za pomocą odpowiednich przekształceń macierzowych [4].



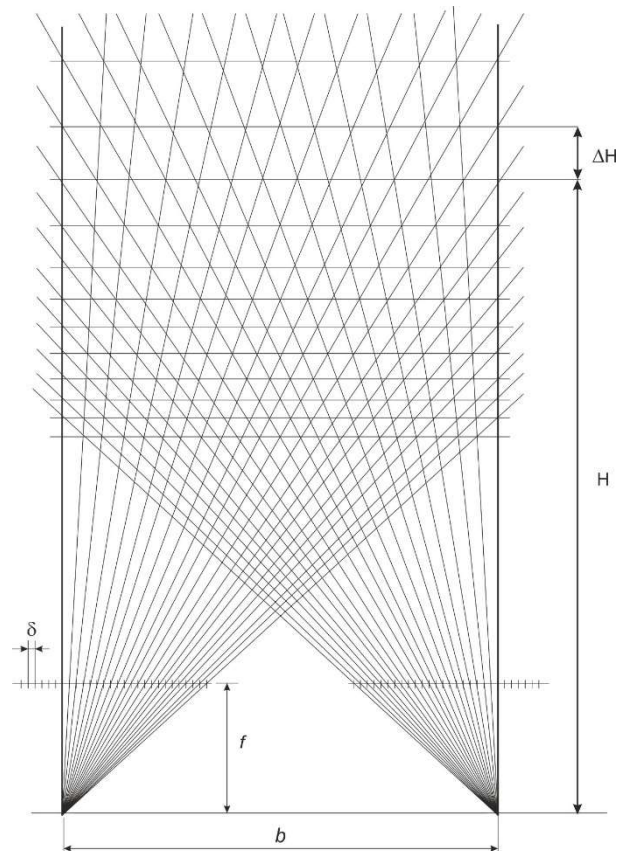
Rys. 9.5 Konieczność rektyfikacji pary obrazów w przypadku nierównoległych osi optycznych

W ogólnym przypadku zagadnienie rekonstrukcji parametrów trójwymiarowych obiektów przestrzennych na podstawie analizy kilku obrazów dwuwymiarowych jest problemem bardzo złożonym ze względu na wprowadzane przez kamery zniekształcenia oraz konieczność prowadzenia czasochłonnych obliczeń dla wszystkich punktów obrazu.

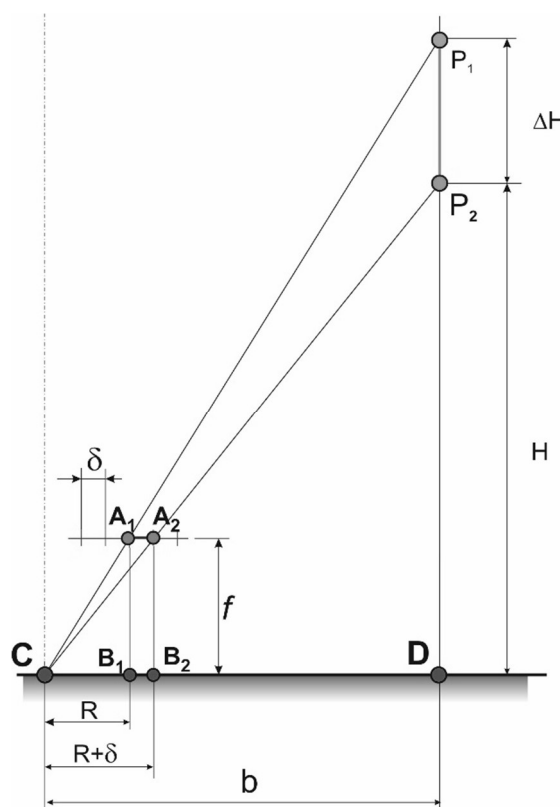
9.3 ROZDZIELCZOŚĆ METODY STEREOWIZYJNEJ

Istotnym zagadnieniem w praktycznych zastosowaniach metod stereowizyjnych jest kwestia rozdzielczości pomiaru głębi – gdyż zmienia się ona nieliniowo wraz z odległością powierzchni obserwowanego obiektu od wspólnej płaszczyzny obrazów stereoskopowych. W sposób poglądowy przedstawiono to zjawisko na rys. 9.6.

Zależności ilościowe wyznaczono dla pary wybranych punktów przedstawionych na rys. 9.7.



Rys. 9.6 Nieliniowa zależność rozdzielczości pomiaru głębi od odległości mierzonego obiektu od płaszczyzny obrazu.



Rys. 9.7 Podstawowe zależności geometryczne dla wyznaczenia rozdzielczości pomiaru stereowizyjnego

Dla „dalszego” punktu P_1 można na podstawie podobieństwa trójkątów CP_1D oraz CA_1B_1 zapisać zależność

$$\frac{H + \Delta H}{b} = \frac{f}{R} \quad (9.1)$$

Dla „bliższego” punktu P_2 na podstawie podobieństwa trójkątów CP_2D oraz CA_2B_2 zapisać zależność:

$$R + \delta = \frac{f \cdot b}{\Delta H} \quad (9.2)$$

Wówczas

$$\delta = \frac{f \cdot b}{H} - \frac{f \cdot b}{H + \Delta H} = f \cdot b \frac{\Delta H}{H(H + \Delta H)} \quad (9.3)$$

oraz

$$\frac{H}{b} = \frac{f}{R + \delta} \quad (9.4)$$

Zależności (9.2) i (9.3) można przekształcić do postaci

$$R = \frac{f \cdot b}{\Delta H + H} \quad (9.5)$$

Czyli długość odcinka P_1P_2 będzie wynosić

$$\Delta H = \frac{\delta}{f \cdot b} H(H + \Delta H) \quad (9.6)$$

Ponieważ $\Delta H \ll H$ to można wzór (9.6) uprościć do postaci

$$\Delta H \approx \frac{\delta}{f \cdot b} H^2 \quad (9.7)$$

Rozdzielczość $\left(\frac{1}{\Delta H}\right)$ jest zatem odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości obiektu od układu optycznego.

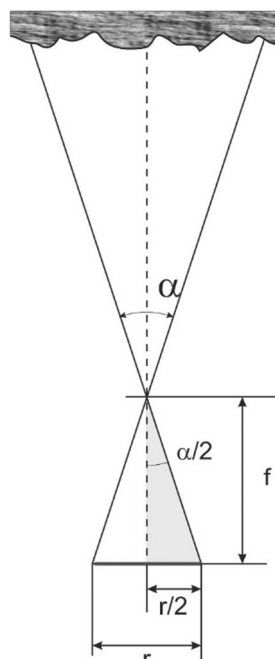
9.4 WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

Dla zastosowanej na stanowisku laboratoryjnym kamery HD typu Logitech C920 o rozdzielczości poziomej (czyli zgodnej z kierunkiem ruchu taśmy) $r = 1920$ pix i kącie widzenia w płaszczyźnie poziomej $\alpha = 70^\circ$ można zgodnie z rys. 9.8 zapisać:

$$\frac{r}{2f} = \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (9.8)$$

czyli:

$$f = \frac{r}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{1920}{2 \operatorname{tg}(35^\circ)} = 1371 \text{ pix} \quad (9.9)$$

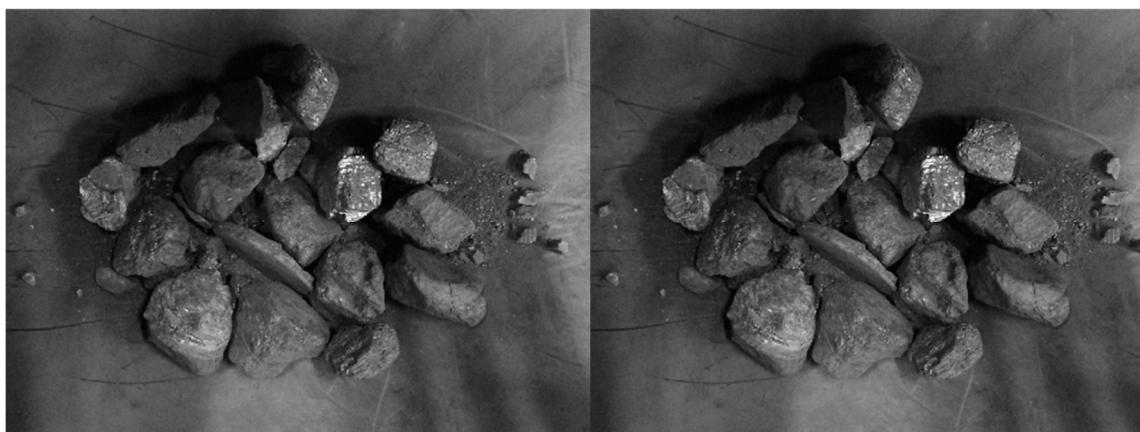


Rys. 9.8 Podstawowe zależności geometryczne umożliwiające wyznaczenie wartości ogniskowej na podstawie danych podawanych przez producenta kamery

Wówczas dla przemieszczenia $\delta = 1$ pix występującego na dwóch zdjęciach dokonanych w odległości $b = 0,4$ m z wysokości $H = 0,8$ m nad taśmą przenośnika można wyznaczyć rozdzielczość układu:

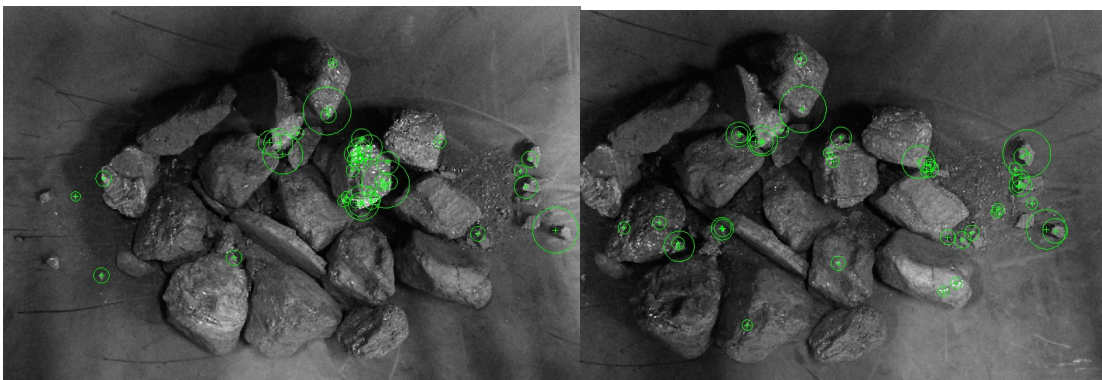
$$\Delta H \approx \frac{1}{1371 \cdot 0,4} 0,8^2 = 0,0011 \text{ m/pix} \approx 1 \text{ mm/pix} \quad (9.10)$$

Pierwszym etapem badań metody stereowizyjnej była akwizycja dwóch obrazów odpowiadających przesunięciu taśmy przenośnika z próbką węgla o odległość 0,4 m. Obrazy te przedstawiono na rys. 9.9. Zgodnie z rys. 9.4.b, wyznaczono część wspólną podlegającą dalszej analizie (została ona przedstawiona na rys. 9.10), a następnie zidentyfikowano charakterystyczne punkty (narożniki, krawędzie) na obydwu obrazach. W tym celu wykorzystano metodę SURF (*Speeded-Up Robust Features*) opisaną w [1] oraz zaimplementowaną w bibliotece OpenCV [3].

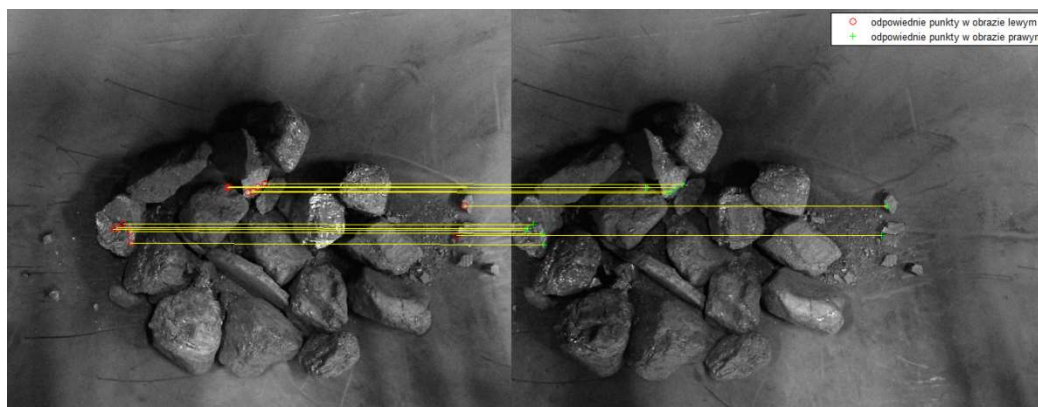


Rys. 9.9 Para obrazów stereoskopowych odwzorowujących próbkę węgla podlegającą analizie

Dopasowanie pewnej liczby odpowiadających sobie punktów na obydwu obrazach przedstawionych na rys. 9.11 umożliwiło zawężenie zakresu dalszego przeszukiwania i ułatwiło wyznaczenie dla każdego punktu różnicy jego współrzędnych w osi podłużnej (zgodnej z kierunkiem ruchu taśmy) określanej mianem dysparycji. Zerowa wartość dysparycji pomiędzy dwoma obrazami oznacza że dany punkt położony jest w nieskończonej odległości od obserwujących go kamer, natomiast wraz ze wzrostem wartości dysparycji odległość ta maleje. Dokładną wartość dysparycji dla każdego punktu wyznaczono maksymalizując wartość funkcji korelacji wzajemnej między dwoma obrazami w otoczeniu danego punktu o rozmiarze 25 pikseli.

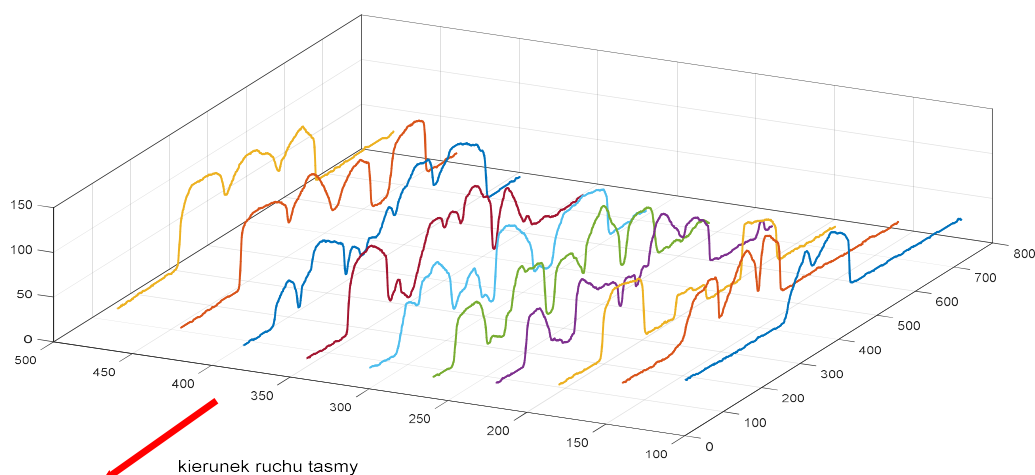


Rys. 9.10 Wybrane charakterystyczne punkty pary obrazów stereoskopowych z rys. 9.9

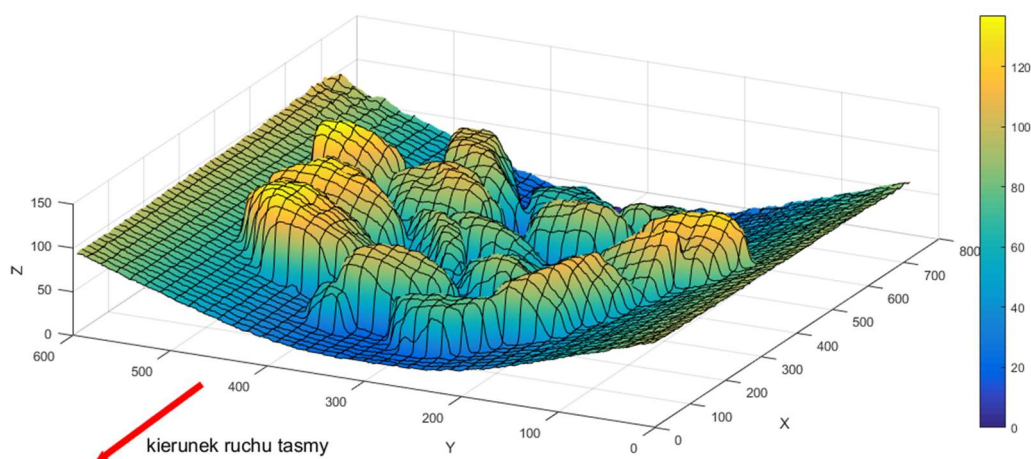


Rys. 9.11 Dopasowanie wybranych charakterystycznych punktów na obydwu obrazach

Dzięki zachowaniu współliniowości ruchu taśmy z kierunkiem skanowania obrazu, przeszukiwanie mogło zostać ograniczone do przypadku jednowymiarowego (wzdłuż równoległych linii epipolarnych), co w bardzo istotny sposób zmniejszyło złożoność obliczeniowa. Przykłady takiej analizy i wyznaczenie wysokości obserwowanej powierzchni strumienia materiału dla wybranych linii epipolarnych przedstawiono na rys. 9.12, a uzyskana w ten sposób (po zagęszczeniu analizy do wszystkich pikseli obrazu) mapę głębi przedstawiono na rys. 9.13.



Rys. 9.12 Wyznaczone dla wybranych - w celu zwiększenia czytelności obrazu - linii epipolarnych wysokości powierzchni poszczególnych ziaren badanej próbki



Rys. 9.13 Mapa głębi wyznaczona dla całego obszaru próbki

9.5 PODSUMOWANIE

Obecnie istnieje kilka metod akwizycji obrazów trójwymiarowych. Każda z tych metod ma swoje wady i zalety, uwydatniające się w konkretnych zastosowaniach. W przypadku wykorzystania tych metod w zastosowaniu do wizyjnej analizy składu ziarnowego należy stwierdzić, że zagadnienie to charakteryzuje się specyficznymi uwarunkowaniami utrudniającymi poprawną pracę układów akwizycji i interpretacji obrazu:

- duża ilość podobnych do siebie obiektów (ziaren),
- czarny kolor powierzchni węgla,
- szybki ruch taśmy przenośnika,
- szeroki zakres zmienności rozmiarów ziaren.

Podstawową zaletą stereowizyjnej akwizycji obrazów trójwymiarowych jest możliwość bezpośredniego uzyskania obrazu o wysokiej rozdzielczości bez konieczności stosowania wyspecjalizowanego sprzętu (jak w przypadku mierzących czas przesyłu światła między kamera a powierzchnią obserwowanego obiektu)

kamer typu time-of-flight). Zwykle zastosowanie metody stereowizyjnej wymaga wykorzystania co najmniej dwóch odpowiednio skalibrowanych kamer i czasochłonnego procesu rektyfikacji obrazu. Dzięki wykorzystaniu prostoliniowego ruchu taśmy przenośnika możliwe jest zastosowanie tylko jednej kamery i pominięcie procesu rektyfikacji. Niestety podstawową wadą jest duża złożoność obliczeniowa związana z koniecznością precyzyjnej identyfikacji odpowiadających sobie punktów na obydwu obrazach. Stąd też celowe jest stosowanie obliczeń równoległych np. z wykorzystaniem technologii CUDA stosowanej w kartach graficznych [5].

LITERATURA

1. H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars. „SURF: Speeded Up Robust Features.” *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, vol. 110, no. 3, pp. 346-359, 2008.
2. B. Cyganek. „Wprowadzenie do pomiaru głębi obrazu za pomocą stereoskopowego układu kamer.” *Przegląd Spawalnictwa*, nr 3, pp. 38-43, 2013.
3. K. Dawson-Howe. *A Practical introduction to Computer Vision with OpenCV*. Chichester: Wiley, 2014.
4. R. Hartle, A. Zissermann. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edition. Cambridge: CUP, 2003.
5. J. Sanders, E. Kandrot. *CUDA w przykładach. Wprowadzenie do ogólnego programowania procesorów GPU*. Gliwice: Helion, 2012.

Data przesłania artykułu do Redakcji: 10.2016

Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 03.2017

dr inż. Adam Heyduk

Politechnika Śląska,
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska
e-mail: adam.heyduk@polsl.pl

METODY STEREOWIZYJNE W ANALIZIE SKŁADU ZIARNOwego

Streszczenie: Stereowizja jest jednym ze sposobów akwizycji obrazów trójwymiarowych, opartym na naśladowaniu funkcjonowania ludzkiego układu wzrokowego. W artykule przedstawiono podstawowe zasady stereowizji oraz koncepcję zastosowania tej metody do analizy powierzchniowej warstwy strumienia materiału ziarnistego na ruchomej taśmie przenośnika. Dzięki wykorzystaniu ruchu taśmy możliwa jest realizacja prostego układu stereowizyjnego z wykorzystaniem tylko jednej kamery o wysokiej rozdzielczości, wykonującej zdjęcia w krótkim odstępie czasu. Przedstawiono wyniki wstępnych badań przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym. Przeanalizowano zalety i wady metod stereowizyjnych w porównaniu z innymi sposobami akwizycji obrazów trójwymiarowych. Podstawową zaletą jest mała złożoność sprzętowa i stosunkowo niski koszt oraz wysoka rozdzielczość uzyskiwanych obrazów, natomiast podstawową wadą – wysoka złożoność obliczeniowa w przypadku obrazów obejmujących dużą liczbę ziarn (drobne sortymenty), związana z koniecznością identyfikacji odpowiadających sobie punktów w sekwencji dwóch kolejnych obrazów.

Słowa kluczowe: stereowizja, analiza obrazu, skład ziarnowy

STEREOVISION METHODS IN GRANULOMETRIC ANALYSIS

Abstract: Stereovision is a way of three-dimensional image acquisition based on the imitating the operation of the human visual system. The article discusses basic stereovision principles and the concept of application of this method to the granulometric analysis of the surface layer of a particulate material stream on a moving conveyor belt. Through the use of the belt movement it is possible to design a simple stereovision system with a single high resolution camera, recording two pictures within a short time interval. There have been presented some results of preliminary tests performed on a laboratory stand. There have been also described the advantages and disadvantages of stereovision methods compared with other types of three-dimensional images acquisition methods. The main advantage is a low hardware complexity, relatively low cost and high resolution of recorded images, but the main drawback - high computational complexity for images involving a large number of particles (fine granulometric classes), associated with the need to identify the corresponding points in the sequence of two successive images.

Key words: stereovision, image analysis, particle size distribution