

ADAM DUBIK

HENRYK Z. KOWALSKI

[535.317.1:535.41/.42]:528.7

Sposoby rejestracji, rekonstrukcji i pomiaru hologramów dla celów fotogrametrycznych

1. Wstęp

Do momentu pojawienia się holografii znanych było kilka metod pomiaru obiektów trójwymiarowych ze zdjęć.

Są to metody:

- fotogrametryczna,
- pasm moire,
- cięć płaszczyznami świetlnymi.

Wraz z postępowaniem w rozwoju metod holograficznych stał się możliwy pomiar obiektu na podstawie obrazów rekonstruowanych z hologramów, ponieważ, jak zaznaczyliśmy to w poprzednich opracowaniach, przy zachowaniu odpowiednich warunków obrazy rekonstruowane z hologramu mogą być dokładną kopią obiektu holografowanego [1 i 2].

Hologram można traktować jako zbiór nieskończonej ilości stereopar, z których wybór każdej może być dokonany poprzez obranie odpowiedniego punktu obserwacji w stosunku do samego hologramu. I w tym przypadku stereomodel tworzy się w świadomości obserwatora. Z powyższego wynika, że hologram ma nadmiar informacji, lecz jego własności pozwalają na obserwację stereomodelu przy dowolnej bazie i pod różnym kątem, oczywiście z ograniczeniami na wielkość hologramu.

Jak wiadomo, z hologramu rekonstruuja się dwa obrazy: rzeczywisty (stereomodel rzeczywisty), który można obserwować np. na ekranie matowym umieszczonym przed hologramem, i pozorny (stereomodel pozorny), widziany nie uzbrojonym okiem przez hologram. Pomiaru stereomodeli rekonstruowanych z hologramu można dokonać tak na obrazie rzeczywistym, jak i pozornym.

Stereomodel pozorny może być pomierzony za pomocą rzeczywistego punktu świetlnego, którego współrzędne w obszarze obrazu mogą być

określone za pośrednictwem mechanizmu pomiarowego i odczytane na licznikach ruchów X , Y , Z .

Zasada pomiaru stereomodelu rzeczywistego opiera się na oczywistym fakcie, że zawiera on konkretną energię świetlną, co umożliwia pomiar rozkładu gęstości tej energii w przestrzeni obrazu rzeczywistego i pozwala określić jego wymiary. Aby zwiększyć dokładność pomiaru, na obrazy rekonstruowane można nanieść metodami interferencyjnymi linie konturowe.

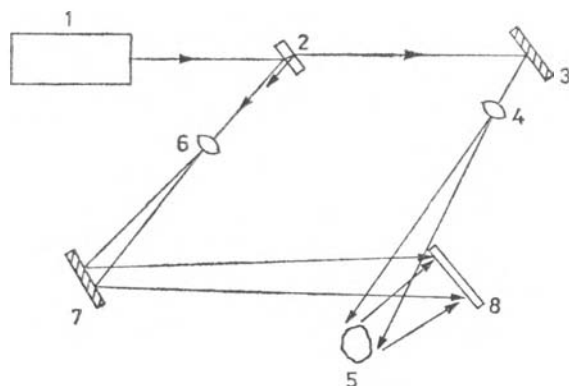
Z przytoczonych rozważań wynika, że holograficzne metody pomiaru można sprowadzić do:

- pomiaru stereomodelu rzeczywistego,
- pomiaru stereomodelu pozornego,
- pomiaru interferencyjnego.

W dalszej części opracowania przedstawiona zostanie realizacja praktyczna hologramów różnych typów i pomiary obiektów rekonstruowanych z tych hologramów.

2. Praktyczna realizacja rejestracji i rekonstrukcji holograficznej przedmiotów niewielkich

W niniejszej części opracowania zostanie przedstawiony schemat prostego układu holograficznego, którego realizacja umożliwi otrzymanie dobrej jakości hologramów, jak również rekonstrukcję obrazu wysokiej jakości. Opisywany układ składa się z niewielkiej ilości elementów optycznych i może być wykonany w dowolnym laboratorium, posiadającym laser. Na rysunku 1 przedstawiony został schemat układu optycznego, służącego do rejestracji holograficznej.



Rys. 1

Jako źródło światła można użyć lasera o niewielkiej mocy rzędu kilku mw. Może to być np. laser gazowy He-Ne, pracujący w poprzecznym modzie podstawowym TEM₀₀, produkowany w kraju. Holografowany obiekt o niewielkich rozmiarach umieszcza się w pozycji 5. Wiązka świetlna generowana przez laser 1 charakteryzuje się spójnością i monochromatycznością, co umożliwia uzyskiwanie interferencji. Jest ona dzielona płytką światłodzielną 2 (napylany klin optyczny), która przepuszcza około 90% natężenia strumienia laserowego, a odbija od powierzchni czołowej pozostałą część promieniowania. Wiązka przechodząca przez płytkę światłodzielną nosi nazwę wiązki informacyjnej lub przedmiotowej, ze względu na informację, jaka za jej pośrednictwem dociera do płaszczyzny materiału światłoczułego.

Wiązka informacyjna kierowana jest za pośrednictwem zwierciadła 3 na obiektyw 4, który poszerza jej średnicę. Tak ukształtowana wiązka oświetla holografowany przedmiot, który staje się niejako niezależnym źródłem nieskończonej ilości fal, z których każda charakteryzuje się swoim parametrem amplitudy i fazy.

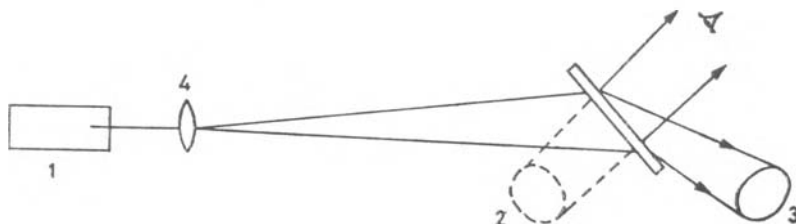
Faza niesie informację o głębi obiektu, natomiast amplituda odpowiada za jego własności absorbcyjne. Światło rozproszone przez obiekt 5 dociera do płaszczyzny 8, w której umieszczony jest wysokorozdzielczy materiał światłoczuły, np. 10E75 firmy Agfa-Gevaert.

Jednocześnie odbita wiązka od elementu światłodzielnego poszerzana jest przez obiektyw 6 i również kierowana zwierciadłem 7 na materiał światłoczuły 8. Wiązka ta nosi nazwę wiązki odniesienia. W płaszczyźnie materiału światłoczułego powstaje interferencja tych dwóch wiązek, która jest fotografowana. Wywołany i utrwalony materiał światłoczuły staje się hologramem. Pod powiększeniem hologram nie przypomina rejestrowanego przedmiotu. Jest to nie uporządkowana struktura plamkowa, która jak wykazano w poprzedniej pracy [2], zawiera informacje o amplitudzie i fazie sygnału świetlnego, a tym samym o głębi obiektu. Przy rejestracji, drogi optyczne wiązki informacyjnej i wiązki odniesienia powinny być jednakowe, gdyż wtedy występuje maksymalny kontrast struktury interferencyjnej. Układ optyczny rekonstrukcji hologramu przedstawiony został na rysunku 2.

Wiązka odniesienia z lasera 1 oświetla przez soczewkę 4 hologram, z którego rekonstruuja się dwa stereomodele — pozorny 2, widoczny gołym okiem przez hologram, i rzeczywisty 3, który rekonstruuje się za hologramem i może być „wizualizowany”, np. na ekranie matowym. Tak stereomodel rzeczywisty, jak i pozorny są modelami pomiarowymi. Do każdego z nich stosuje się jednak inną metodę pomiaru. Jak już przedstawiono poprzednio, na wierność odtworzonego z hologramu obrazu mają wpływ takie parametry, jak kształt frontu falowego wiązki rekonstruującej, kąt jej pa-

dania na hologram czy deformacje emulsji w procesie obróbki fotochemicznej.

Należy dążyć do tego, aby wiązka rekonstruująca była „kopia” wiązki odniesienia wykorzystywanej w procesie rejestracji, jak również stosować niskoskurczową obróbkę fotochemiczną materiałów fotograficznych.



Rys. 2

3. Cechy charakterystyczne stereomodeli holograficznych

Wykonanie bezpośrednio hologramów dużych powierzchni terenu jest na razie niemożliwe ze względu, między innymi, na brak źródeł światła o odpowiednio dużej energii. Konieczny jest więc zapis fotograficzny terenu, z którego można syntezować hologram. Można w takim przypadku wprowadzić pojęcie „stereomodelu holograficznego”.

Znanych jest kilka metod otrzymania stereomodelu holograficznego:

- 1) metoda hologramu Fresnela,
- 2) metoda hologramu skupionego obrazu,
- 3) metoda hologramu punktowego (quasi-Fouriera).

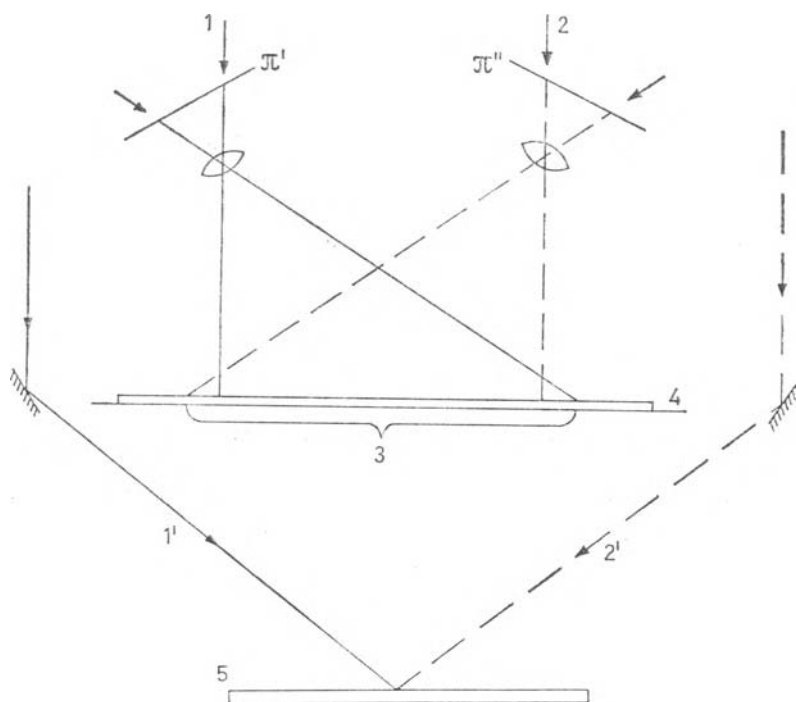
Holograficzna rejestracja stereomodelu wymaga użycia dwóch wiązek odniesienia, odpowiednio dla każdego z dwóch zdjęć fotogrametrycznych (stereopary).

Stereomodel holograficzny można wykonać z przezroczystych płyt lub odbitek. Poniżej zostaną omówione i porównane niektóre metody wykonywania holograficznych stereomodeli.

3.1. Hologram Fresnela

Rysunek 3 przedstawia schemat zapisu stereomodelu holograficznego metodą hologramu Fresnela. Oba zdjęcia π' i π'' są zorientowane względnie, tak że światło koherentne 1 i 2, przechodząc przez nie, tworzy stereomodel 3. W przestrzeni stereomodelu fotogrametrycznego umieszcza się ekran przeswiecający 4, który służy do usunięcia paralaksy i umożliwia holograficzne zapisanie stereomodelu.

Zamiast wykonywania hologramów zdjęć zorientowanych względem siebie, można wykonać hologramy zdjęć przedtem przetworzonych. Projektacja każdego zdjęcia jest zapisywana oddzielnie. Jeśli zdjęcie π' jest oświetlone światłem laserowym 1, to jako wiązka odniesienia jest wykorzystywana wiązka $1'$. Płyta holograficzna 5 jest naświetlana przez obie te wiązki, 1 i $1'$. Podobnie, oświetlając zdjęcie π'' i wykorzystując wiązkę odniesienia 2 i $2'$ naświetla się tę samą płytę 5 (bez zmiany jej położenia) po raz drugi.



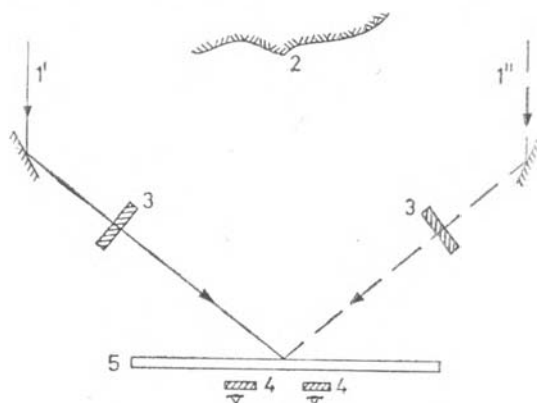
Rys. 3

Rozdzielenie promieni odniesienia jest niezbędne ze względu na konieczność rozdzielania zdjęć podczas odtwarzania hologramu.

Na rysunku 4 przedstawiony jest układ stosowany do odtwarzania stereomodelu holograficznego. Koherentne wiązki rekonstruujące są spolaryzowane (polaryzatory 3) względem siebie prostopadłe. Odtworzony $1'$ i $1''$ stereomodel 2 z hologramu 5 jest obserwowany przez takie same filtry polaryzacyjne 4, jakie były użyte do polaryzacji wiązek odniesienia 1 i $1''$. Polaryzacja wiązek jest niezbędna w celu rozdzielania obrazów obu zdjęć stereoskopowych. Zaletą zastosowania filtrów polaryzacji prostokątnej jest to, że przez ich obrót można uchwycić moment, kiedy efekt stereoskopowy

jest najlepszy. Może to przyczynić się do zwiększenia dokładności opracowania stereomodelu.

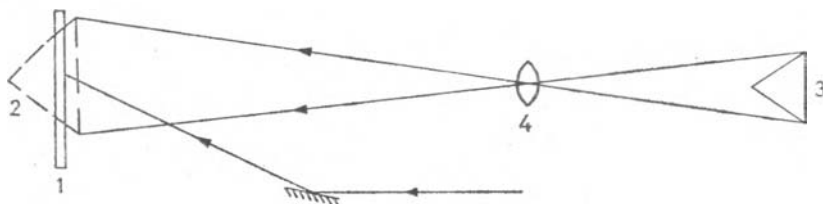
Zaletą hologramów Fresnela (bezpośrednich lub stereomodeli) jest ich niewrażliwość na występowanie wad emulsji, np. rys na niej itp. Dzieje się tak dlatego, że na płycie zapisuje się obraz interferencyjny i każdy punkt hologramu zawiera pełną informację o stereomodelu.



Rys. 4

3.2. Holograficzny stereomodel skupionego obrazu

Hologram 1 skupionego obrazu 2 obiektu 3 powstaje w bezpośrednim sąsiedztwie obrazu wytworzonego przez soczewkę (obiektyw 4), znajdującą się przed przedmiotem. Schemat rejestracji pokazano na rysunku 5. Cechą charakterystyczną takiego hologramu jest to, że do jego odtworzenia można użyć światła niekoherentnego.



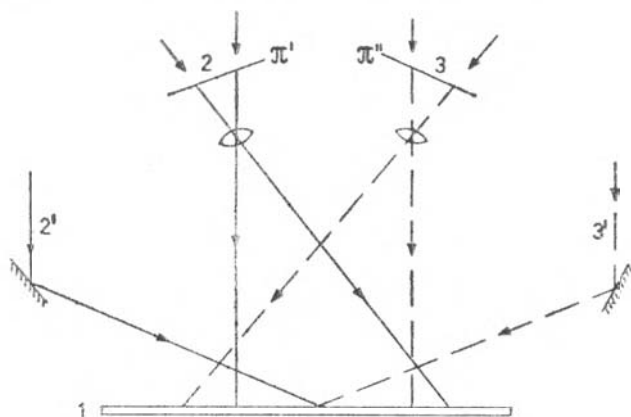
Rys. 5

Schemat wykonania hologramu obrazu skupionego ze stereomodelu jest przedstawiony na rysunku 6. Tu ekran projekcji tylnej jest zastąpiony samą płytą holograficzną 1. Po zestrojeniu modelu π' i π'' ekran usuwa się i na jego miejsce umieszcza się płytę światłoczułą 1, a następnie dokonuje się ekspozycji wiązką 2, najpierw jednego zdjęcia, a później drugiego

wiązką 3 (jak przy tworzeniu hologramu Fresnela). Do odtworzenia stereomodelu używa się układu analogicznego, jak na rysunku 4. Do obserwacji również używa się filtrów polaryzacyjnych. Przy rekonstrukcji obrazu można użyć źródła światła niespójnego zamiast lasera.

Holograficzny stereomodel posiada następujące cechy:

— Wielkość stereomodelu jest ograniczona rozmiarami płyty światłoczułej (w wypadku hologramu Fresnela wielkość płytki hologramu jest znacznie mniejsza niż odtworzony obraz stereomodelu).



Rys. 6

— Hologram skupionego obrazu jest wrażliwy na rysy, gdyż jest on tworzony punkt po punkcie, a nie tak jak hologram fresnelowski. Tu na jednej płycie z dobrym wynikiem można zarejestrować tylko jeden hologram (przy fresnelowskim hologramie więcej).

— Zaletą jest usunięcie ekranu projekcji tylnej, który powoduje dytorsję obrazów rzutowanych ze zdjęć.

— Zaletą jest także możliwość odtwarzania hologramu obrazu skupionego bez użycia światła koherentnego.

Może się wydawać, że wykonywanie hologramów ze zdjęć lotniczych jest niecelowe. Tak jednak nie jest, gdyż stereomodel holograficzny daje określone korzyści w porównaniu ze stereomodelem fotogrametrycznym. Na hologramie zapisywane są nie tylko dwa zdjęcia, lecz i ich wzajemna orientacja. Na jednej płycie (przy hologramie fresnelowskim) można zapisać wiele stereomodeli, co daje oszczędność materiału i miejsca na magazynowanie.

Następną zaletą holograficznego stereomodelu jest możliwość jego opracowania na prostych przyrządach, co daje oszczędności ekonomiczne. Przyrządem do dokładnego opracowania hologramu może być trójosiowy komparator ze świetlną marką pomiarową i stół do opracowania graficznego.

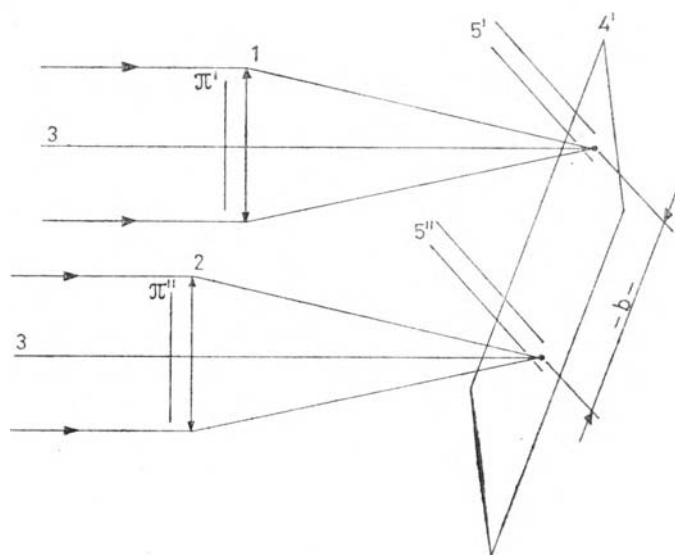
Zestaw taki jest o wiele prostszy niż np. autograf. Można więc będzie zorganizować jedno stanowisko centralne do wykonywania hologramów stereomodeli, którego wyniki pracy byłyby wykorzystywane przy opracowaniach na prostych urządzeniach pomiarowych, obsługiwanych przez personel o niższych kwalifikacjach fotogrametrycznych.

Dzięki zastosowaniu hologramów stereomodeli będzie można wykorzystywać taki stereomodel w pracowniach kartograficznych, co zwiększy jakość interpretacji materiałów wykorzystywanych przy opracowaniu map.

Jeśli w wyniku strojenia zdjęć, przed wykonaniem hologramów ze stereomodelu, wystąpią duże nachylenia projektorów, to należy przechylić także ich obiektywy, w celu spełnienia warunku Czapskiego-Scheimpfluga. Przy wykonywaniu i odtwarzaniu hologramów stereomodeli głęboka ostrość obiektywów kilkakrotnie wzrasta, dzięki użyciu światła koherentnego.

3.3. Punktowy hologram stereomodelu

Wykonanie punktowego hologramu stereomodelu (hologramu quasi-Fouriera) przedstawia rysunek 7. Soczewki 1 i 2 oddalone są od siebie o wielkość bazy ocznej b . Przed lub za soczewkami umieszczamy zdjęcia

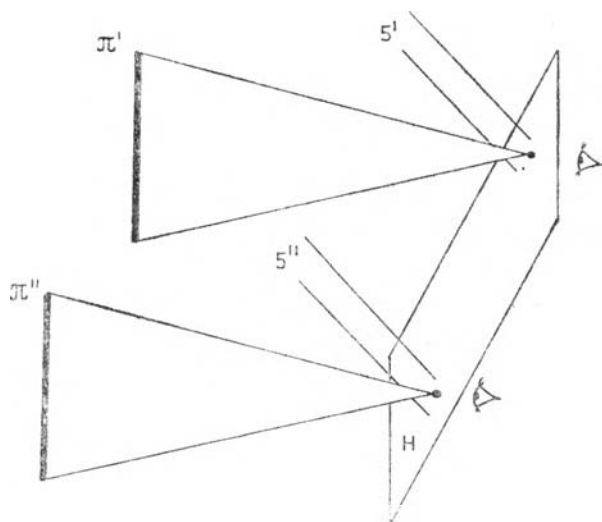


Rys. 7

π' , π'' . Koherentne, monochromatyczne światło 3, przechodzące przez soczewki 1 i 2, uformowane zostanie w płaszczyźnie 4 w widmo Fouriera zdjęć π' i π'' . Widma te są poddane interferencji z bocznymi wiązkami odniesienia $5'$ i $5''$. W ten sposób zostanie zarejestrowany hologram quasi-

-Fouriera stereogramu w dwóch punktach materiału światłoczułego. Materiał światłoczuły ustawimy w niewielkiej odległości przed ogniskiem soczewek 1 i 2, gdyż w samym ognisku występuje strata informacji związana z charakterystyką materiałów światłoczułych. Taki zapis daje zwiększoną rozdzielczość rekonstruowanych obrazów.

Na płycie można zarejestrować wiele stereogramów. Warunkiem prawidłowego dokonania rejestracji holograficznej jest zachowanie stałości kątów padania fal odniesienia dla stereogramów quasi-Fouriera. Po wywołaniu i utrwaleniu materiał światłoczuły staje się hologramem. Odtwarzamy go przez oświetlenie dwoma wiązkami, takimi samymi jak wiązki



Rys. 8

odniesienia, padającymi pod takim samym kątem jak one. Patrząc na hologramy, tak jak na rysunku 8, w miejscach, gdzie przy rejestracji hologramów znajdowały się fotogramy, rekonstruuja się ich obrazy holograficzne. Do prawego oka dociera obraz π' , do lewego π'' . Widzimy więc model stereoskopowy utworzony ze zdjęć π' , π'' . Można go mierzyć za pomocą świetlnego znacznika pomiarowego. Do rekonstrukcji obrazów niepotrzebne są żadne układy optyczne. Niezbędne operacje wykonuje soczewka oczna. Jest to zaletą tych hologramów. Taki zapis stereogramów pozwala na dużą oszczędność materiałów oraz miejsca przy ich magazynowaniu (na jednej płycie światłoczułej można zapisać wielką ilość stereogramów). Poza tym, razem ze zdjęciami zapisana jest ich orientacja wzajemna, przez co jest eliminowany proces strojenia przy opracowaniu stereogramu.

4. Synteza obrazu trójwymiarowego na podstawie zdjęć przedmiotów dużych

Jeżeli na hologramie rejestrowany jest obiekt dyfuzyjnie rozpraszający, to najmniejszy wycinek tego hologramu, jak wiadomo, może zrekonstruować swój wymiarowy obraz rzeczywisty i pozorny. Rekonstruowane z każdego wycinka hologramu obrazy różnią się od siebie w zależności od miejsca położenia tego wycinka w hologramie. Przy oglądaniu obrazu przez taki mały wycinek hologramu, na siatkówce oka obserwatora tworzy się obraz płaski. Tworzące się obrazy na siatkówce prawego i lewego oka są różne, co w efekcie daje powstawanie głębi przestrzeni. Załóżmy, że jesteśmy w stanie zarejestrować hologram o takich własnościach, że każdy mały wycinek hologramu, przez który oko ogniskuje się, na obrazie rekonstruuje tylko dwuwymiarowy pozorny obraz obiektu.

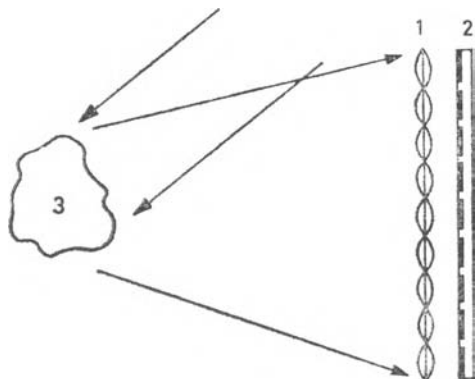
Jeżeli obraz ten ulega odpowiednio zmianie od jednego wycinka hologramu do następnego, to mózg obserwatora i w tym wypadku odbierał będzie różne „lewy” i „prawy” obrazy, na skutek czego zostanie wywołane wrażenie głębi przestrzeni. Efekt taki może być osiągnięty za pomocą hologramu złożonego. Każdy element takiego hologramu rejestruje światło przechodzące tylko przez jedno zdjęcie z całego zbioru zdjęć obiektu trójwymiarowego. Przy rekonstrukcji obrazu pojawia się efekt paralaksy.

4.1. Przygotowanie zdjęć do wykonania hologramu złożonego

Jedną z metod rejestracji zdjęć wykorzystywanych do zapisu elementów hologramu złożonego pokazano na rysunku 9. Macierz soczewek 1 (rastr soczewkowy) tworzy na płycie materiału światłoczułego 2 zbiór obrazów obiektu 3. Każdy z tych obrazów daje zdjęcie, będące fotografią obiektu obserwowanego pod różnym, niewielkim kątem. Wykorzystanie rastru jest niezbędne tylko w wypadku obiektu, którego parametry ulegają zmianom w czasie. Jeżeli obiekt jest stacjonarny, zbiór obrazów może być wytworzony kolejno w różnych miejscach materiału światłoczułego, na drodze kolejnego przemieszczania soczewki tworzącej obraz obiektu. Można także dokonać rejestracji wielu klatek na kliszy fotograficznej, używając do tego celu aparatu fotograficznego przemieszczonego odpowiednio w określonej płaszczyźnie.

Podobnie zresztą jak w wypadku zdjęć stereoskopowych, zdjęcia otrzymane powyższą metodą nie muszą odzwierciedlać realnych obiektów. Jest to jedno z najbardziej interesujących zastosowań holograficznej syntezy obrazu otrzymanego np. z komputera. Przy tym sam obiekt nie musi istnieć w rzeczywistości, niezbędne są jedynie współrzędne jego punktów zare-

jestrowane w pamięci maszyny matematycznej. Rejestracja hologramów złożonych ma szereg zalet w porównaniu z zapisem bezpośrednim hologramów. Możliwa jest rejestracja obiektów dużych, np. terenu w świetle białym, obiektów niestacjonarnych czy nie istniejących w rzeczywistości. Przejdziemy dalej do opisu syntezy hologramu na drodze wykorzystania otrzymanych powyższymi metodami zdjęć.



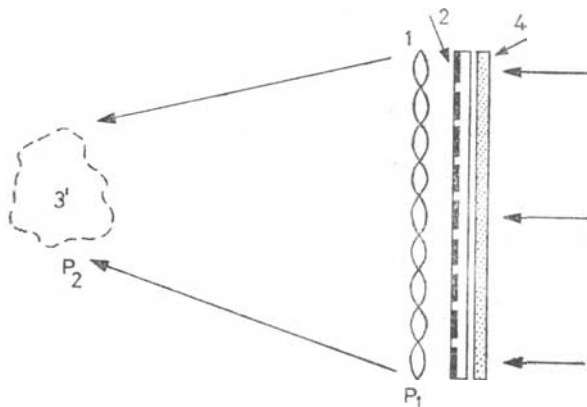
Rys. 9

4.2. Rejestracja holograficzna

Założmy, że zbiór zdjęć obiektu otrzymany był z użyciem rastru soczewkowego, wg schematu przytoczonego wyżej (rys. 9). Oświecimy tak otrzymany zbiór zdjęć rozproszonym (matówka 4 przed zdjęciami) światłem laserowym od strony prawej (rys. 10). Kiedy światło przejdzie przez każdy obraz, poszczególne elementy rastru soczewkowego 1 tworzą rzeczywiste obrazy obiektu w miejscach położenia obiektu wyjściowego. Obrazy te syntezują razem trójwymiarowy obraz obiektu 3'. Taki syntezowany obraz może być zarejestrowany holograficznie. Należy jednak zauważyć, że obraz rzeczywisty, utworzony przez promienie biegnące przeciwnie niż promienie wysyłane przez obiekt wyjściowy, jest obrazem pseudoskopowym. Hologram pseudoskopowego rzeczywistego obrazu obiektu powinien być oświetlony przy rekonstrukcji wiązką sprzężoną z wiązką odniesienia. W tym wypadku powstały z hologramu obraz jest obrazem ortoskopowym.

Zwykle hologram rejestrowany jest w płaszczyźnie między rastrem a syntezowanym obrazem. Jeżeli hologram zapisany jest w płaszczyźnie P_1 (rys. 10) lub w jej pobliżu, to tworzone są holograficzne elementy dyskretne, a zapis taki odpowiada hologramowi złożonemu. Jeżeli hologram zapisywany jest w płaszczyźnie obrazu P_2 , staje się on superpozycją hologramów obrazów skupionych. W ostatnim wypadku, celem uzyskania dużej

sprawności dyfrakcyjnej przy rejestracji hologramu zbiór zdjęć należy oświetlić równocześnie. Kiedy elementy hologramu są rozdzielone przestrzennie, w wypadku rejestracji w pobliżu płaszczyzny P_1 dobre rezultaty osiągane są zarówno przy jednoczesnej, jak i kolejnej ekspozycji zdjęć zbioru.

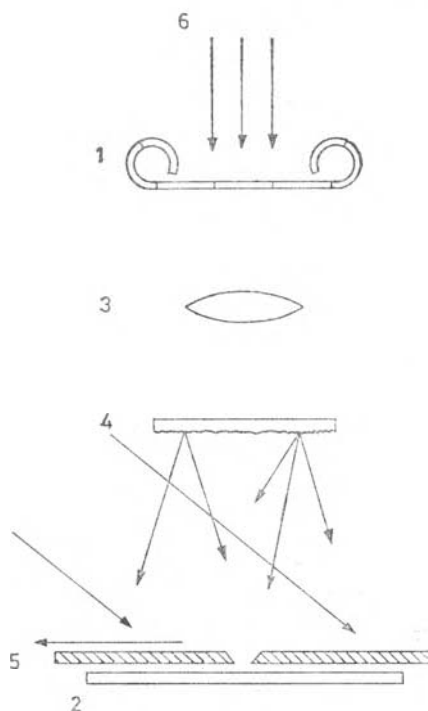


Rys. 10

Jeżeli materiał światłoczuły umieszczony jest w pobliżu rastru soczewkowego, wiązka odniesienia powinna padać od strony przeciwnej, tworząc hologram odbiciowy. Hologram taki może być odtwarzany w świetle białym.

Schemat przedstawiony na rysunku 11 umożliwia z dużą swobodą dokonywanie zapisu hologramu złożonego, wykorzystując do tego celu zbiór zdjęć stereoskopowych. Podstawowymi elementami układu są: zbiór zdjęć 1, płytka holograficzna 2 światła lasera 6, nieruchomy obiektyw projekcyjny 3, dyfuzor 4 i maska 5, która może przemieszczać się nad powierzchnią materiału holograficznego. Rozpatrzmy proces zapisu dla wypadku, kiedy zdjęcia ze zbioru różnią się tylko kątem azymutalnym rejestracji. Załóżmy, że wprowadzimy w wiązkę lasera zdjęcia odpowiadające tej części obiektu, którą widać przez prawą część hologramu. Na matowym ekranie za pomocą soczewki tworzony jest obraz zdjęcia wejściowego. Dyfuzor rozprasza światło po całej powierzchni hologramu. Szczelina ekranu ma takie położenie, że przez nią dokonywana jest rejestracja pionowego pasma w prawej części hologramu. Światło rozproszone przez dyfuzor (matówka), padające na szczelinę, można traktować jako ekwiwalent światła rozproszonego przez obiekt dyfuzyjny. Sposób ten nie daje jednak przy rekonstrukcji paralaksy pionowej. Przy rejestracji każdego hologramu cząstkowego (lokalnego) następuje interferencja wiązki odniesienia o stałych parametrach z wiązką informacyjną. Rejestracja drugiego pasma hologramu, bezpośrednio przy-

legającego do pierwszego, następuje po odpowiednim przemieszczeniu szczeliny oraz zmianie pierwszego zdjęcia zbioru przez następne. I tak kolejno rejestrowany jest zbiór zdjęć stereoskopowych w postaci elementów



Rys. 11

hologramu złożonego. Oświetlając tak wykonany hologram złożony wiązką rekonstruuującą, taką samą jak wiązka odniesienia przy rejestracji, obserwator widzi trójwymiarowy obraz pozorny, którego paralaksa jest związana z zakresem kątów rejestracji zbioru zdjęć.

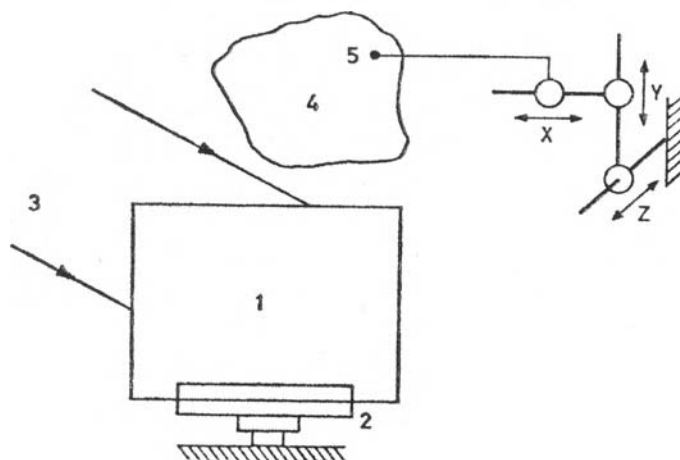
5. Pomiar obrazu za pośrednictwem rzeczywistego punktu świetlnego

Możliwość obserwacji nie uzbrojonym okiem stereomodelu pozornego, rekonstruowanego z hologramu, pozwala na wizualną ocenę wzajemnej odległości punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Zasadę metody przedstawiamy na rysunku 12.

Hologram 1 zamocowany w podstawie 2 oświetlony jest wiązką światła spójnego. Obserwator, patrząc przez hologram, widzi obraz pozorny 4 zarejestrowanego obiektu trójwymiarowego. W wypadku, gdy zarejestrowa-

na jest większa liczba obiektów, obserwator widzieć będzie te wszystkie, które znajdują się w kącie obserwacji, określonym wymiarami hologramu.

Głębina ostrości obrazu jest określona głęboką ostrości oka, podobnie zresztą jak i przy obserwacji wizualnej zwykłych przedmiotów. Jeżeli w przestrzeni rekonstrukcji stereomodelu pozornego zostanie umieszczony rzeczywisty punkt świetlny 5 (np. zakończenie cienkiego światłowodu) o niewielkich wymiarach, to obserwując przestrzeń przez hologram, będziemy jednocześnie widzieli i obraz pozorny, i punkt świetlny.



Rys. 12

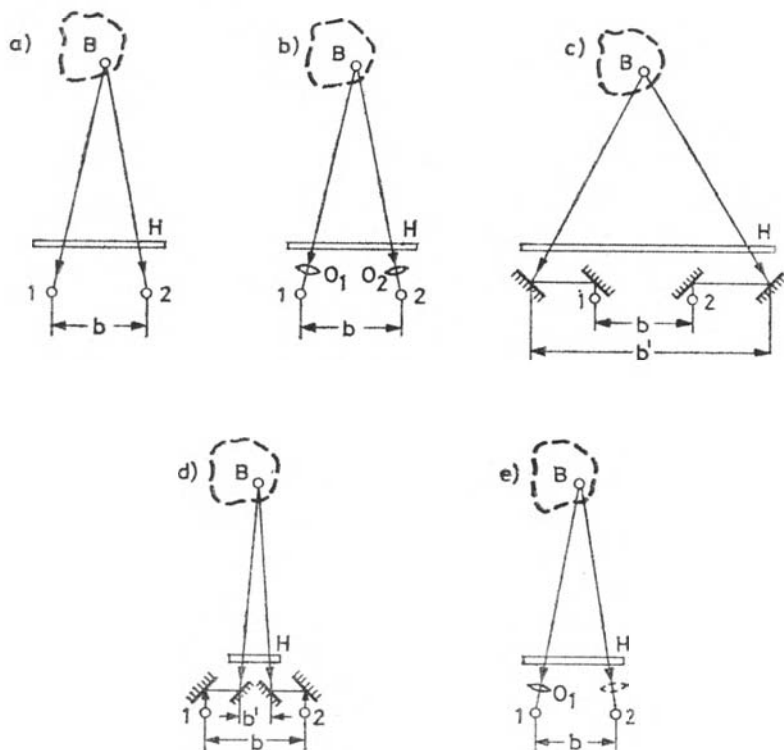
Położenie tego punktu może być odczytane na licznikach ruchów X , Y , Z . Uzgadniając położenie punktu świetlnego z dowolnym punktem charakterystycznym stereomodelu, można odczytać to położenie tak względem przyjętego układu współrzędnych, jak i względem wzajemnego położenia punktów obiektu. Na tej właśnie drodze można dokonać pomiaru skomplikowanego trójwymiarowego obrazu obiektu rzeczywistego. W trakcie pomiaru stereomodelu możliwa jest ciągła zmiana kierunku obserwacji, oczywiście przy ograniczeniach, o których była mowa wyżej.

Dokładność naprowadzenia punktu świetlnego na wybrany punkt obrazu zależy od rozdzielczości widzenia. Sam efekt trójwymiarowości, jak i usytuowanie przedmiotów w przestrzeni, mogą być otrzymane tak przy obserwacji binokularnej, jak i monokularnej.

Rozpatrzmy kilka charakterystycznych schematów pomiarowych.

Schemat na rysunku 13a przedstawia pomiar obiektu na podstawie stereomodelu pozornego, rekonstruowanego z hologramu, przy czym jego rozmiar poprzeczny jest większy od bazy ocznej. W tym wypadku baza pomiarowa równa jest bazie ocznej. Zaletą tego schematu jest jego prosto-

ta. Schemat z rysunku 13 b różni się od poprzedniego wprowadzeniem układu optycznego, dającego powiększenie, celem zwiększenia dokładności pomiaru. Na rysunku 13 c został przedstawiony schemat pomiarów dla wypadku, kiedy rozmiary hologramu są na tyle duże, że pozwalają zwiększyć bazę pomiarów. Obserwator widzi rekonstruowany obraz i punkt świetlny za pośrednictwem układu zwierciadeł. Baza pomiarowa b' jest zwiększona w stosunku do bazy ocznej b , co pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów względem osi Z.



Rys. 13

W tym ostatnim wypadku można zwiększyć dokładność pomiaru przez wprowadzenie dodatkowego układu optycznego. Stosując układ zwierciadeł, można również dokonywać pomiarów obiektów na podstawie stereomodeli rekonstruowanych z hologramów, których rozmiary są mniejsze od bazy ocznej (rys. 13 d). Dokładność pomiaru spada, lecz można ją zwiększyć przez zastosowanie układu optycznego.

Układ z rysunku 13 e służy do obserwacji monokularnej i jest szczególnie wygodny przy małych rozmiarach hologramu, wykluczających sto-

sowanie innych metod. W tym wypadku obserwator widzi przez układ optyczny o dużym powiększeniu, rekonstruowany obraz oraz punkt świetlny. Przemieszczając kolejno układ optyczny z położenia 1 do 2, określa się bazę pomiarową.

Podobnie, również za pomocą rzeczywistego p-tu świetlnego można dokonać pomiaru obrazu rzeczywistego. Pomiar obrazu rzeczywistego można również automatyzować za pomocą tzw. wibrującej diafragmy i określenia gęstości energii świetlnej w przestrzeni obrazu rzeczywistego.

Metoda automatycznego określania ekstremalnych miejsc energii świetlnej pozwala uniknąć wpływu błędów osobistych obserwatora i zwiększyć szybkość opracowania pomiaru stereomodelu rzeczywistego.

Dla bardziej skomplikowanych obiektów można również metodami holograficznymi (podwójnej ekspozycji, kilku długości fal, immersyjnej) nanosić prążki interferencyjne, które pozwalają automatyzować pomiar tych stereomodeli.

6. Zakończenie

Podany przez nas krótki przegląd metod rejestracji i rekonstrukcji holograficznej miał na celu zapoznanie czytelnika z możliwościami zastosowania techniki holograficznej w fotogrametrii, ze szczególnym uwzględnieniem aspektu praktycznego. Brak tego rodzaju opracowań krajowych pod określonym kątem tematycznym hamuje rozwój zastosowań holografii, która w wielu przodujących krajach świata zajęła już poczesne miejsce. Zdajemy sobie sprawę z tego, że ta nowa technika jest uzupełnieniem istniejących już metod pomiarowych, jednakże szersze jej upowszechnienie może w znacznym stopniu podnieść efektywność opracowań fotogrametrycznych.

LITERATURA

- [1] Kowalski H. Z., Dubik A.: Kierunki zastosowania optyki światła spójnego i holografii w geodezji i kartografii. *Prace IGiK t. XXII, zeszyt 1(50)*, 1975.
- [2] Dubik A., Kowalski H. Z.: Wpływ sposobu rejestracji i rekonstrukcji obiektu na niektóre parametry obrazów odtwarzanych z hologramu. *Prace IGiK t. XXII, zeszyt 2(51)*, 1975.

Rękopis złożono w Redakcji w listopadzie 1975 r.

АДАМ ДУБИК
ХЕНРЫК З. КОВАЛЬСКИ

СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ, РЕКОНСТРУКЦИИ И ИЗМЕРЕНИИ ГОЛОГРАММ ДЛЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В работе дан обзор схем для практического осуществления регистрации и реконструкции голограмм объектов небольших предметов.

Описаны характерные черты голографических стереомоделей, а в особенности рассмотрены и сравнены следующие методы их получения:

- метод голограммы Френеля,
- метод голограммы сплоченного (сосредоточенного) изображения,
- метод голограммы точечной (квази-Фурье).

В статье описан синтез трехмерного изображения на основе снимков больших предметов с использованием для этой цели сложных голограмм, описан также метод регистрации элементов сложной (составной) голограммы.

Рассмотрено несколько характерных измерительных схем, в частности в отношении до мнимых стереомоделей, стереомодели реконструированной с голограммы, когда её поперечный размер есть больше, чем глазной базис размер голограммы есть на столько большой, что разрешает увеличить базис измерения и другие.

Представлен также метод измерения действительных стереомоделей, в том также интерференционный метод.

ADAM DUBIK
HENRYK Z. KOWALSKI

METHODS OF RECORDING, RECONSTRUCTION AND MEASUREMENT OF HOLOGRAMS FOR PHOTOGRAMMETRIC PURPOSES

Summary

The survey of schemes for practical realization of recording and reconstruction of holograms of small objects' details has been done in this paper.

There are mentioned characteristics of holographic stereomodels and in particular the following methods of their development have been discussed and compared:

- Fresnel hologram method,
- Hologram method of a focussed image,
- Point hologram method (quasi-Fourier's).

Description of the synthesis of three-dimensional image on the basis of large objects photographs using for this purpose the complex holograms has been included in this paper. Method of recording of the complex holograms elements is also described.

A few characteristic measurement schemes has been surveyed with particular reference put to the apparent stereomodels, a stereomodel reconstructed from a hologram providing that its lateral size is larger than the eye base the size of the hologram is large enough to enlarge the basis of the measurements, and other schemes.

Measurement method of real stereomodels as well as the interference method have been introduced in this paper.