

## WYBRANA PROBLEMATYKA HOLOGRAFII OPTYCZNEJ

*Henryk Z. Kowalski, Andrzej M. Skirmunt*

Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie

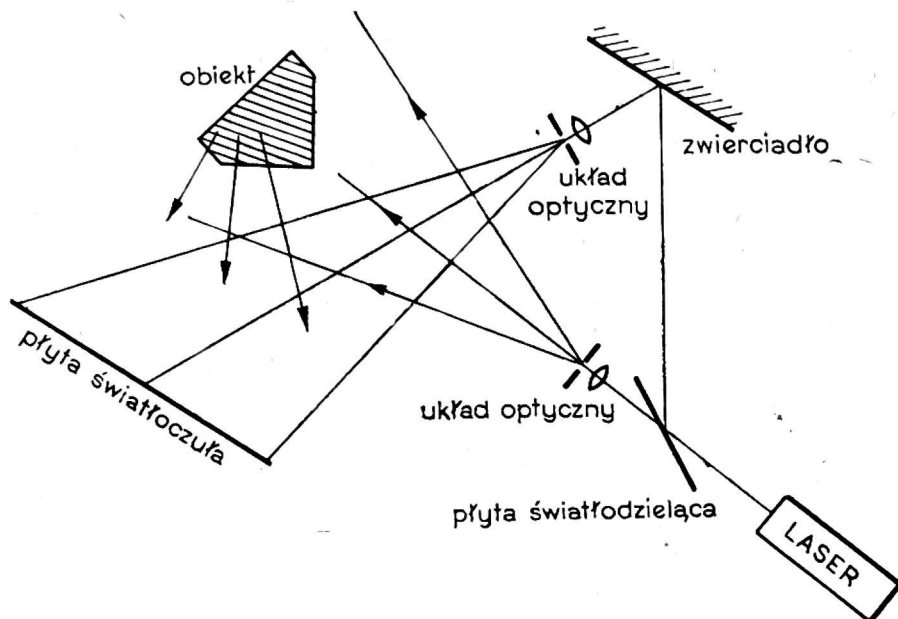
## WSTĘP

W ostatnich latach jesteśmy świadkami burzliwego rozwoju holografii, a w związku z tym wzrostu zainteresowania jej praktycznym wykorzystaniem w wielu dziedzinach techniki. Zainteresowanie to jest w pełni uzasadnione. Jest ono jednak zupełnie inne obecnie aniżeli na początku lat sześćdziesiątych, lat narodzin praktycznej holografii, kiedy to wydawało się, że ta tajemnicza wówczas dla szerokiego ogółu dziedzina rozwiąże w szybkim tempie większość problemów nurtujących świat nauki i techniki. Istotnie, niektóre z nich rozwiązała. Po wielu latach badań udało się wypracować cały szereg metod holograficznych, których znaczenie jest niebagatelne. Wiele z nich stało się decydującym ogniwem licznych procesów badawczych i wytwórczych. Inne są obiektem intensywnych badań.

Nie sposób w ramach tych kilku słów o holografii optycznej zamieścić wszystko, nawet to co najważniejsze, dlatego zdecydowano się na krótkie, pojęciowe przedstawienie jej zasad, metody interferometrii holograficznej, holograficznego gromadzenia informacji i jej obróbki.

## ZASADY HOLOGRAFII

Zasady holografii są przedstawione w licznych publikacjach [3, 6, 10, 11] i nie wydaje się celowe szczegółowe, analityczne ich omawianie. Podstawową cechą tego procesu jest jego dwustopniowość. Stopień pierwszy, zwany procesem zapisu, polega na zarejestrowaniu obrazu interferencyjnego, utworzonego przez dwie fale: falę przedmiotową, pochodzącą od rejestrowanego obiektu i falę odniesienia (rys. 1). Czoło fali przedmiotowej formuje się jako wypadkowa niezliczonej ilości rozchodzących się koncentrycznie fal kulistych, powstałych na skutek zaburzenia przez obiekt oświetlającej go fali świetlnej. Niesie ono pełną, przestrzenną in-

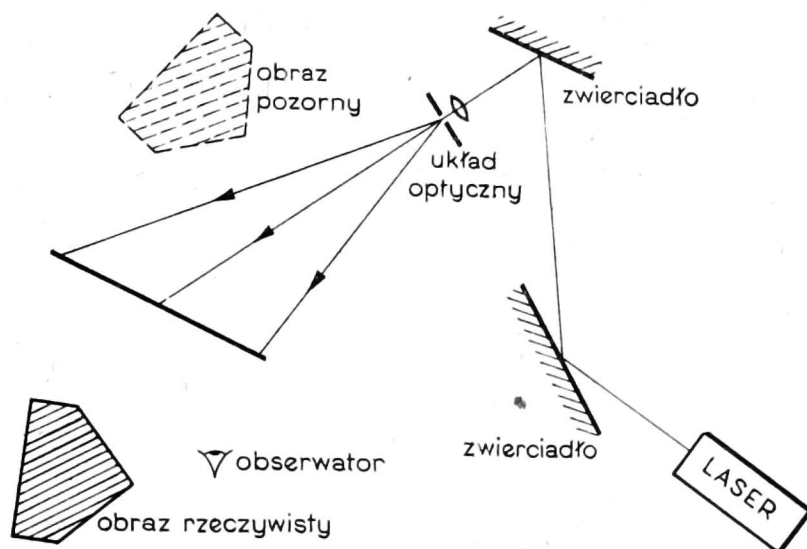


Rys. 1. Schemat układu optycznego do rejestracji holograficznej

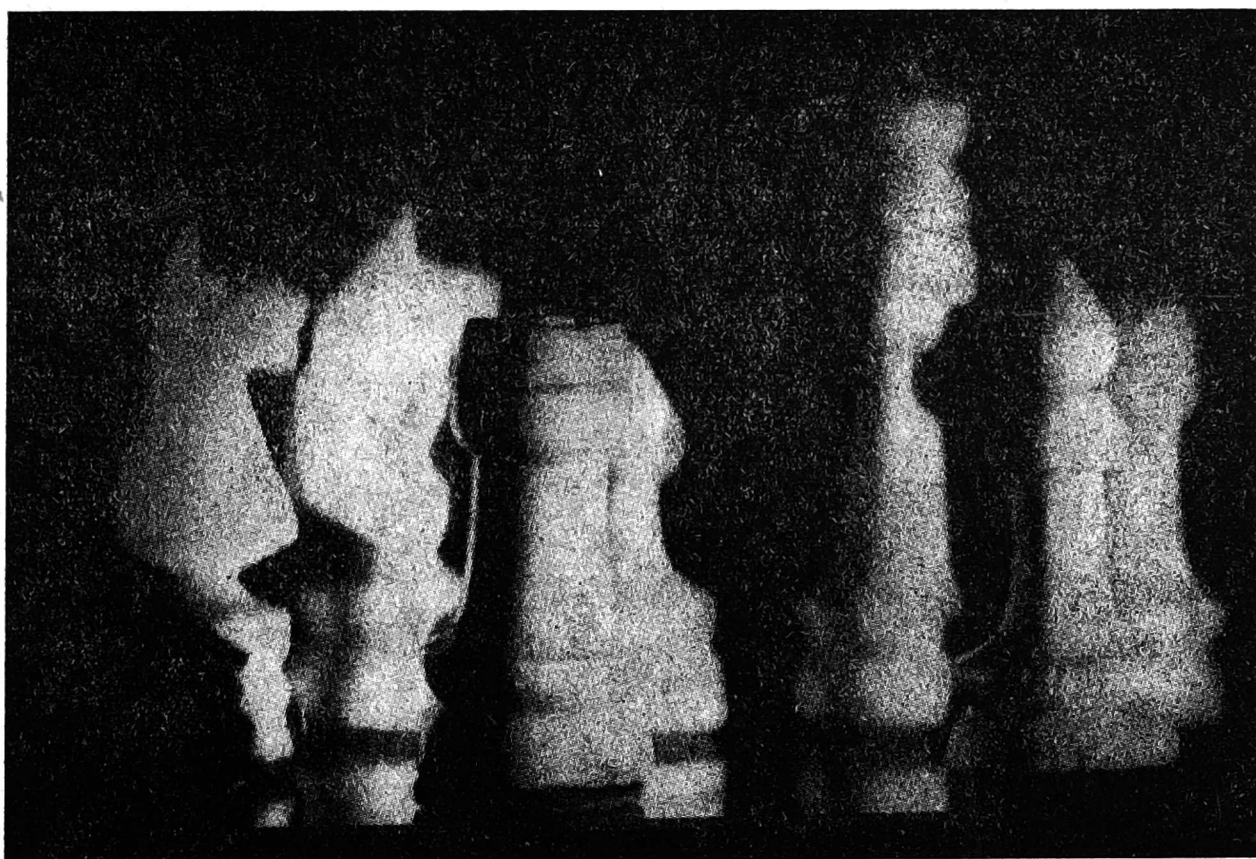
formację o przedmiocie, gdyż zawiera informacje zarówno o natężeniu, jak i fazie składowych fal świetlnych. Istota podstawowego procesu holograficznego polega na doprowadzeniu do interferencji fali odniesienia i fali przedmiotowej, a następnie zarejestrowaniu tego stanu na materiale światłoczułym. Do interferowania zdolne są jedynie fale wzajemnie spójne. A zatem w celu wykonania hologramu konieczne jest, aby wiązka przedmiotowa i odniesienia były spójne, co wymaga stosowania odpowiednich źródeł oświetlenia. Praktycznie źródło uważa się za spójne, jeżeli jest po pierwsze *quasi* punktowe, tzn. gdy jego wymiar kątowy jest dostatecznie mały (spójność przestrzenna), i po drugie — *quasi* monochromatyczne, czyli gdy jego przedział widmowy promieniowania jest dostatecznie wąski (spójność czasowa). Takimi źródłami są lasery. Dla celów holografii używane są najczęściej lasery He-Ne, argonowe, barwnikowe i rubinowe. Uzyskany w powyższy sposób hologram stanowi odpowiednio zakodowaną informację o rozkładzie amplitudy i fazy fali pochodzącej od obiektu. Treść hologramu składa się z pozornie bezładnej kombinacji prążków i pierścieni dyfrakcyjnych.

Stopień drugi procesu holograficznego, zwany procesem rekonstrukcji (rys. 2), polega na odpowiednim oświetleniu hologramu falą rekonstruującą, która jest zwykle identyczna z falą odniesienia. W wyniku tego na skutek dyfrakcji na hologramie fali rekonstruującej odzyskujemy pełną przestrzenną informację o obiekcie w formie dwóch obrazów, obrazu pozornego i rzeczywistego. Widzenie ich charakteryzuje się wszystkimi właściwościami widzenia przestrzennego, to znaczy akomodacją, perspektywą, stereoskopią i paralaksą.

Dla przykładu (rys. 3, 4) przedstawiono fotografie zrekonstruowanych



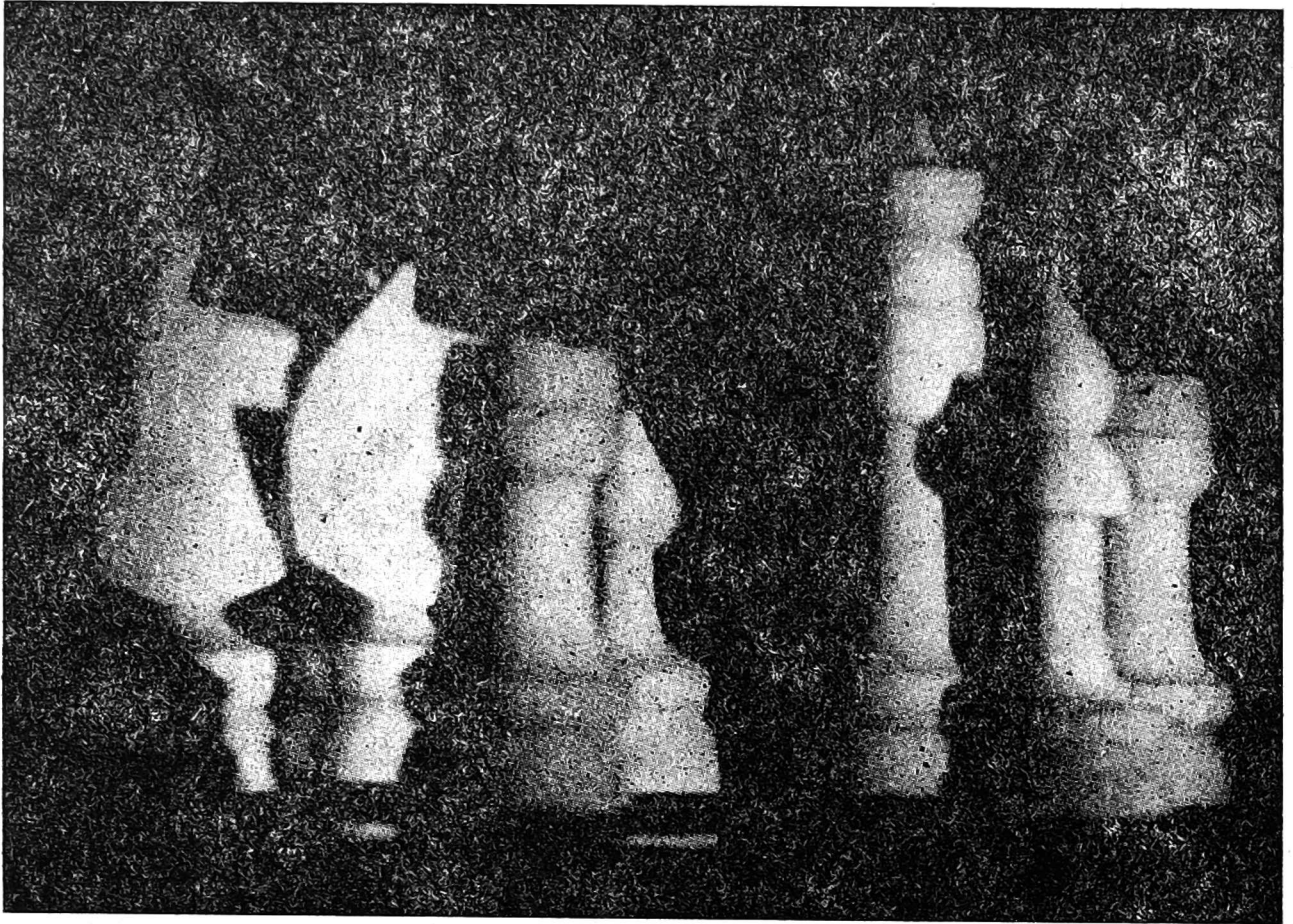
Rys. 2. Schemat układu optycznego do rekonstrukcji holograficznej



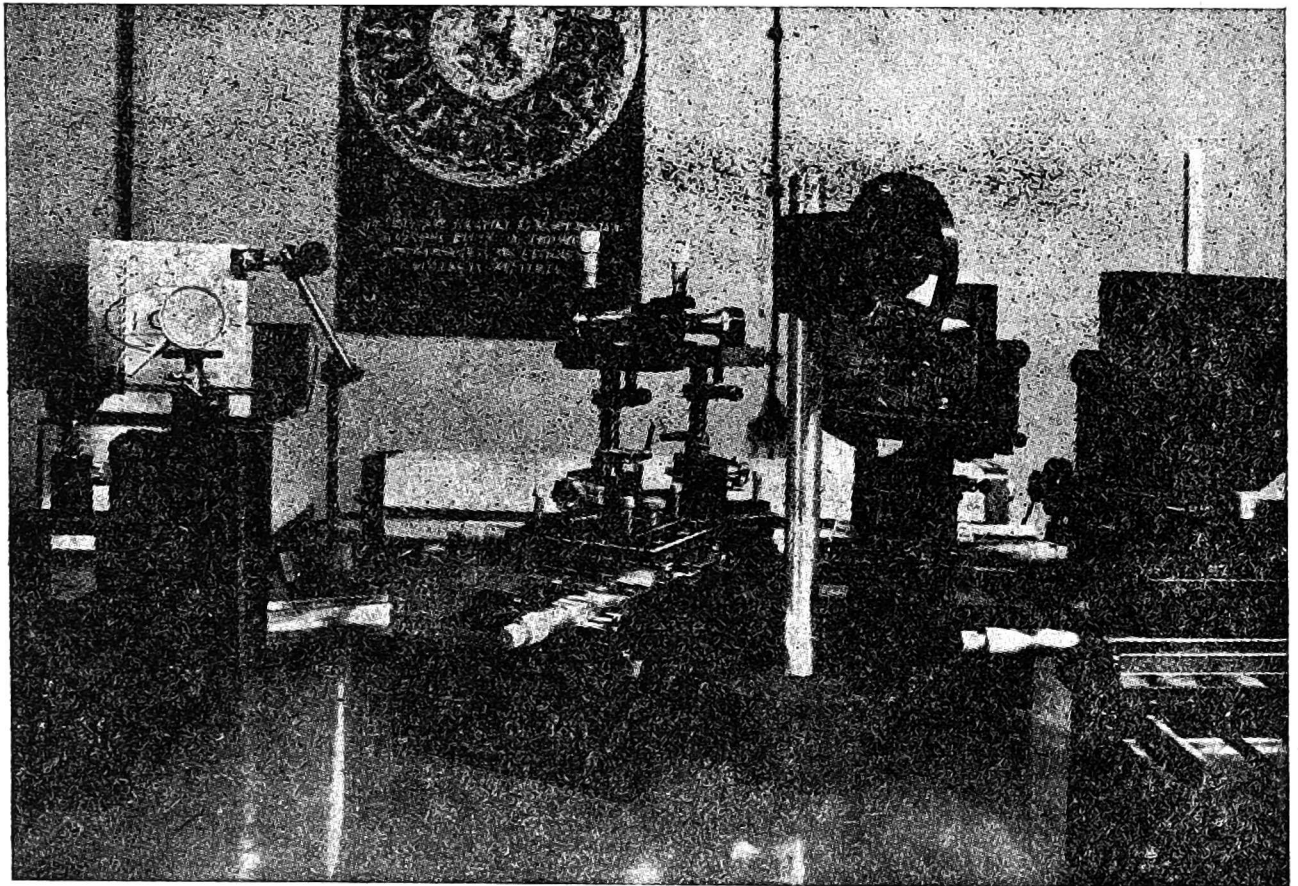
Rys. 3. Fotografia holograficznego obrazu pozornego — obiektyw aparatu fotograficznego zogniskowany na pierwszy plan sceny [IGiK]

obrazów pozornych z hologramów wykonanych w IGiK. Rysunek 5 przedstawia typowy układ optyczny do wykonywania hologramu przedmiotu nieprzezroczystego (IGiK).

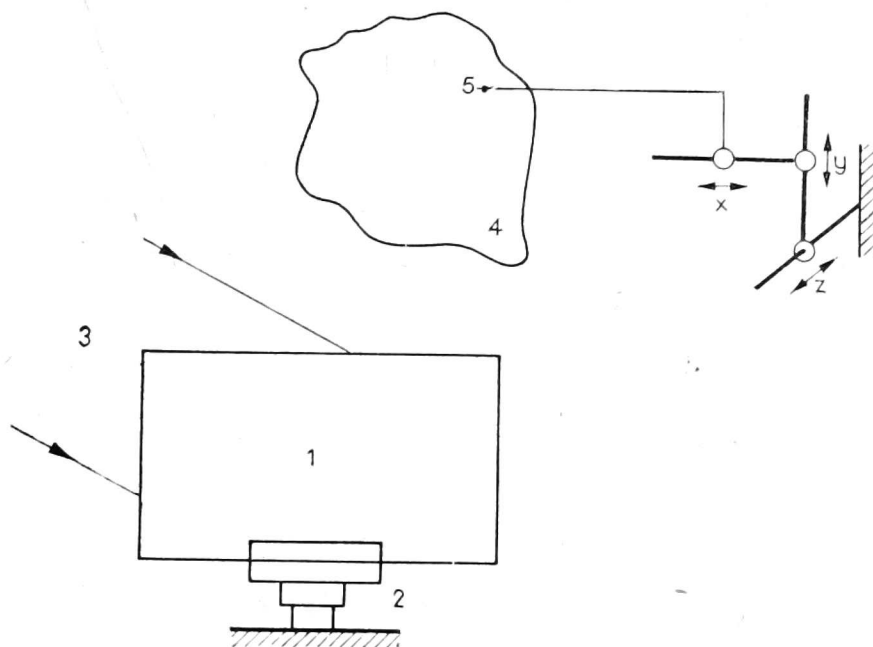
Możliwość obserwacji nie uzbrojonym okiem obrazu pozornego, rekonstruowanego z hologramu, pozwala na wizualną ocenę wzajemnej odległości punktów w przestrzeni trójwymiarowej. Pomiar skomplikowanego trójwymiarowego obrazu obiektu rzeczywistego jest możliwy przy-



Rys. 4. Fotografia holograficznego obrazu pozornego — obiektyw aparatu fotograficznego zogniskowany na drugi plan sceny [IGiK]



Rys. 5. Widok typowego układu aparatury do holograficznej rejestracji obiektów nieprzezroczystych [IGiK]



Rys. 6. Zasada pomiaru trójwymiarowego obrazu holograficznego metodą rzeczywistego punktu świetlnego

kładowo metodą rzeczywistego punktu świetlnego [4]. Zasadę metody przedstawiono na rysunku 6. Hologram 1 zamocowany w podstawie 2 oświetlony jest wiązką światła koherentnego 3. Głębina ostrości obrazu jest określana głęboką ostrości oka, podobnie zresztą jak i przy obserwacji wizualnej zwykłych przedmiotów. Jeżeli w przestrzeni rekonstrukcji 4 zostanie umieszczony rzeczywisty punkt świetlny 5 (np. zakończenie cienkiego światłowodu) o niewielkich wymiarach, to obserwując przestrzeń przez hologram, widać jednocześnie i obraz pozorny i punkt świetlny. Położenie tego punktu może być odczytane na licznikach ruchu X, Y, Z.

Uzgadniając położenie punktu świetlnego z dowolnym punktem charakterystycznym obrazu, można odczytać to położenie tak względem przyjętego układu współrzędnych, jak i względem wzajemnego położenia punktów obiektu.

#### INTERFEROMETRIA HOLOGENICZNA

Badanie wszelkich odkształceń i przesunięć metodą interferencyjną znane było nauce i technice od dawna. Trudność tej metody była jednak znaczna i polegała na tym, że powierzchnia badanego ciała powinna stanowić niemalże optyczne zwierciadło. Holografia zrewolucjonizowała metodę interferencyjną, ze względu na możliwość zastosowania do ciał o jakiegokolwiek powierzchni i kształcie. Ogólnie rzecz biorąc, interferometria holograficzna polega na wytworzeniu przestrzennego obrazu interferencyjnego, powstającego wskutek interferencji fal zawierających informację o tym samym, lecz nieco przemieszczonym lub zdeformowanym przedmiocie. Pole ukształtowane przez rozproszenie światła na przed-

miocie zmienia w sposób przypadkowy, od punktu do punktu, swoje natężenie i fazę. Okazuje się, że takie pole można porównać z polem ukształtowanym przez sam przedmiot w innej chwili czasu. Jeżeli w międzyczasie przedmiot uległ tylko nieznacznym skręceniom, przesunięciom czy też deformacjom, to można znaleźć obszary w przestrzeni, w których pola odpowiadające różnym stanom przedmiotu będą interferowały. Obszary te zwane są obszarami lokalizacji prążków interferencyjnych. Porównanie dwóch pól odpowiadających różnym stanom (a więc i różnym chwilom czasu) tego samego przedmiotu umożliwia tylko holografia. Wybrane metody porównania tych stanów przedstawiono poniżej.

#### INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICZNA W CZASIE RZECZYWISTYM

Metoda polega na wstawieniu obrobionego hologramu w to samo miejsce, które zajmował podczas rejestracji lub na obróbce go w miejscu ekspozycji. Podczas rekonstrukcji oświetla się jednocześnie hologram i przedmiot. Fala ze zrekonstruowanego obrazu nakłada się na falę idącą od samego przedmiotu i wynik interferencji informuje w sposób ciągły o przejściu przedmiotu ze stanu początkowego (moment ekspozycji) do jakiegoś innego. Kolejne zmiany wynikających prążków interferencyjnych można rejestrować kamerą filmową.

Interpretacja układu prążków jest zagadnieniem dość trudnym, jednakże znane są w literaturze metody, przykładowo metoda holodiagramów [1], o zadawalającej dokładności.

Metoda interferometrii holograficznej w czasie rzeczywistym stosowana jest szczególnie przy dynamicznej kontroli układów drgających oraz w procesach technologicznych do kontroli różnego rodzaju elementów. Możliwe byłoby zastosowanie jej do badania, np. wzrostu roślin. Jednakże dla współczesnej nauki i techniki, wymagającej coraz częściej badań zjawisk szybkozmiennych, łatwiejsza w realizacji jej metoda przedstawiona poniżej.

#### INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICZNA Z PODWÓJNĄ EKSPOZYCJĄ

Użycie hologramu w celu dostarczenia jednego czoła fali w interferometrze dla zobrazowania informacji o obiekcie w czasie rzeczywistym jest tylko jedną z wielu możliwości. Możliwe jest oddzielne rejestrowanie na hologramie dwóch czoł fali i zrekonstruowanie ich razem, tak że interferencyjna informacja może być ekstrahowana z powstającej kombinacji. Stanowi to podstawę metody podwójnej ekspozycji. Inaczej mówiąc, metoda umożliwia rejestrowanie na jednym hologramie przedmiotu w dwóch różnych stanach. Przy rekonstrukcji hologramu wiązką odniesienia oba obrazy są jednocześnie zrekonstruowane i jako wzajemnie koherentne interferują. Jeżeli między ekspozycjami zaszły jakieś zmiany,

to przejawiają się one w postaci prążków interferencyjnych, pozwalających ocenić i pomierzyć zaistniałe zmiany geometryczne [8]. Jednym z najbardziej owocnych zastosowań techniki podwójnej ekspozycji jest identyfikacja i pomiar małych przemieszczeń liniowych, kątowych i ich kombinacji, jakim podlega przedmiot między kolejnymi ekspozycjami.



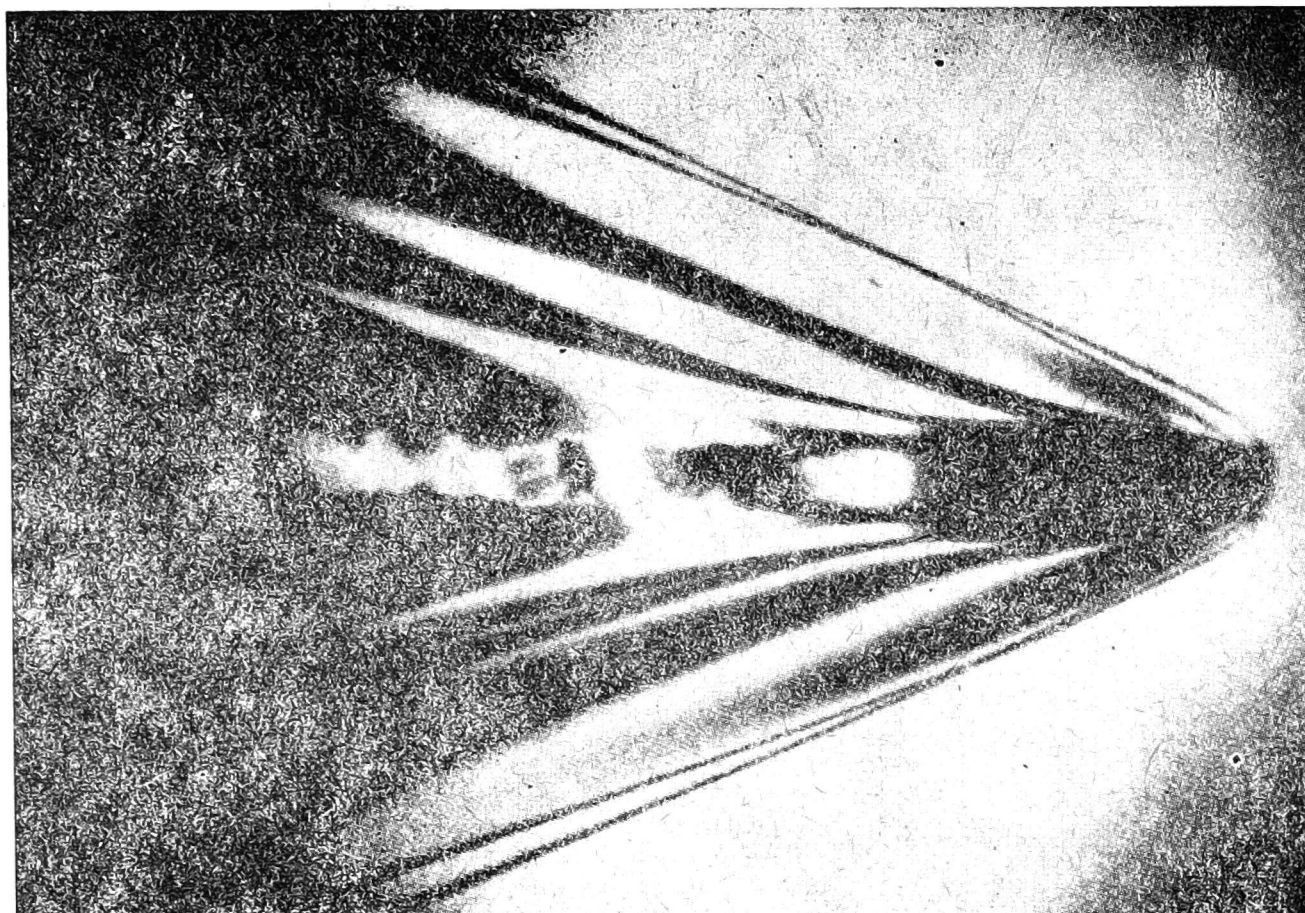
Rys. 7. Interferogram holograficzny przedmiotu wykonany metodą podwójnej ekspozycji — pomiędzy pierwszą i drugą ekspozycją nastąpił obrót przedmiotu względem osi prostopadłej do kierunku obserwacji [IGiK]

Dla przykładu interferogram z rysunku 7 powstał na skutek obrotu części pantografu optycznego, opracowanego w IGiK o kilkadziesiąt sekund kątowych względem osi prostopadłej do kierunku obserwacji.

Jakościowa i ilościowa analiza obrazów interferencyjnych znajduje poza tym zastosowanie np. w badaniu naprężeń (m.in. elastooptyka holograficzna), odkształceń, wykrywaniu mikropęknięć w płytach metalowych.

Zastosowanie laserów impulsowych znacznie poszerza zakres możliwości stosowania metody z podwójną ekspozycją o dziedzinę zjawisk bardzo szybkich, takich jak wyładowania elektryczne w różnych ośrodkach, zjawiska aerodynamiczne itd. Rysunek 8 przedstawia holograficzny interferogram dla wystrzelonego pocisku karabinowego kaliber 0,22, wykonany laserem rubinowym z modulacją dobroci, metodą podwójnej ekspozycji [2]. Pierwsza ekspozycja dokonana została przed wystrzałem, a druga zsynchronizowana z przelotem pocisku. Znakomicie widać tu zawirowania powietrza za pociskiem i falą uderzeniową.

Wykonywanie hologramów z podwójną ekspozycją jest szczególnym



Rys. 8. Interferogram holograficzny lecącej kuli karabinowej — metoda podwójnej ekspozycji [2]

przypadkiem metody bardziej ogólnej, metody ekspozycji wielokrotnej, gdzie podczas ekspozycji interferuje  $n$  fal odpowiadających  $n$  ekspozycjom wykonanym w chwilach  $t_1, t_2 \dots t_n$ . Z metody podwójnej ekspozycji wywodzi się wprost technika holograficznego warstwicowania obiektów trójwymiarowych.

#### HOLOGRAFICZNE WARSTWICOWANIE OBIEKTÓW TRÓJWYMIAROWYCH

Celem tego procesu jest wytworzenie holograficznego obrazu badanego obiektu z prążkami, konturami o równej odległości od ustalonej płaszczyzny, z możliwością wyboru separacji między nimi. Optyczny mechanizm warstwicowania [7] powiązany jest z powiększeniem powiązanym np. ze zmianą długości fali pomiędzy wiązką odniesienia i wiązką rekonstruującą.

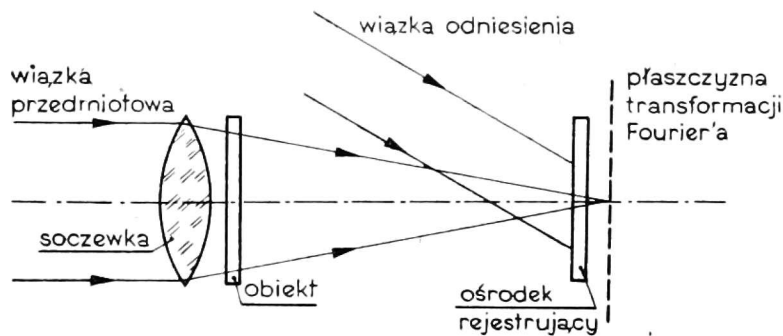
W stadium rejestracji hologramu z podwójną ekspozycją — drugą ekspozycję wykonuje się w tej samej geometrii co pierwszą, lecz z użyciem nieco zmienionej długości fali w stosunku do pierwszej fali. Proces rekonstrukcji odbywa się z użyciem pojedynczej długości fali, formującej dwa obrazy koherentne z małym przemieszczeniem i powiększeniem. Światło z dwu odpowiadających sobie punktów dwóch obrazów interfe-



ruje, wytwarzając jasne i ciemne prążki, obejmujące przedziały poziomów jednakowo odległych od ustalonej płaszczyzny. Technika holograficznego warstwicowania jest jedną z dokładniejszych i szybszych metod opisu kształtu obiektów trójwymiarowych.

#### HOLOGRAFICZNE GROMADZENIE INFORMACJI I JEJ OBRÓBKA

W obecnej dobie każde dziesięciolecie podwaja liczbę informacji naukowej i technicznej. Stan ten rodzi poważny kryzys możliwości jej magazynowania. Zagadnienie zapisu i odtwarzania informacji w zastosowaniu do gromadzenia i magazynowania informacji typu dokumentacyjnego, a także w układach pamięciowych maszyn cyfrowych, stanowi jedno z kluczowych technicznych zainteresowań informatyki. Podstawowe wymagania stawiane technice w tym zagadnieniu dotyczą gęstości zapisu informacji, szybkości jej wybierania, niezawodności w działaniu oraz niskich kosztów produkcji i eksploatacji. Możliwość lepszej realizacji tych wymagań w stosunku do obecnie istniejących rozwiązań daje właśnie holografia, a szczególnie mikroholografia. Gęstość gromadzenia informacji jest teoretycznie ograniczona tylko długością fali światła wykorzystywanego w procesie rejestracji danych. Dla zapisu objętościowego wartość ta jest rzędu  $10^{12}$  bitów/cm<sup>3</sup>, podczas gdy przy zapisie dwuwymiarowym  $10^8$  bitów/cm<sup>2</sup> [9].



Rys. 9. Schemat układu optycznego do mikroholograficznego gromadzenia informacji

Na rysunku 9 zaprezentowano jeden z układów do mikroholograficznego gromadzenia informacji, polegający na holograficznej rejestracji obiektu poza płaszczyzną transformacji Fourier'a. Zagadnienie mikroholograficznego gromadzenia informacji stanowi podstawę prac prowadzonych w zakresie budowy pamięci holograficznej z przeznaczeniem dla maszyn liczących. W tym przypadku magazynowaniu podlega informacja nie w postaci tekstu, a w formie macierzy bitów, przyjmujących jedną z dwóch wartości „0” lub „1”. „0” reprezentuje w informacyjnych układach optycznych brak fali świetlnej, „1” — jej obecność.

Przez pamięć holograficzną rozumie się nie tylko sam sposób zapisu, ale także typowy tylko dla niej system adresowania, oparty na elektrooptycznych i akustycznych deflektorach wiązki światła. System ten w stosunku do współcześnie stosowanych najszybszych pamięci, opartych na półprzewodnikach w znaczny sposób skraca czas dostępu do komórki pamięci.

Połączenie holografii z techniką Fouriera, pozwalającą opisać rozkład częstości przestrzennych przedmiotu w całości lub każdego z jego elementów składowych, stworzyło nową metodę optycznej obróbki informacji. Przykładami możliwości tej metody, bez wnikania w jej istotę, są: rozpoznawanie poszczególnych znaków i obiektów, wyznaczanie podobieństwa kształtów, eliminacja szkodliwych składowych obniżających jakość obrazu fotograficznego, uwypuklenie istotnych szczegółów, konturów, linii o ustalonym kierunku, polepszenie czytelności niewyraźnego tekstu.

#### WNIOSKI

Z przedstawionego materiału niewątpliwie wynika, że holografia nie tylko przewyższa wszystko, co dotychczas osiągnięto w dziedzinie stereoskopowego odtwarzania obiektów przy użyciu techniki fotograficznej, lecz stanowi narzędzie badawcze o dużych możliwościach.

Niektóre z tych możliwości precyzują zaprezentowane w sposób poglądowy zasady interferometrii holograficznej jako tej, która znalazła już szerokie praktyczne zastosowanie, oraz holograficznego zapisu informacji — jako być może w niedługim czasie nowego narzędzia informatyki.

#### LITERATURA

1. Abramson N.: Appl. Opt., 8, 1235, 1960.
2. Brooks R. E., Wuerker R. F., Heflinger L. O., Knox C.: International Colloquium on Gas Dynamics of Explosions, Brussels, Belgium, Sept. 20, 1967.
3. Butters J. N.: Holography and its Technology, Peter Peregrinus Ltd., London, 1971.
4. Dubik A., Kowalski H. Z.: Prace IGiK t. XXIII, z. 1 (52), 1976.
5. Friesun A. A., Tompkins E. N., Hoffman G. E.: 15th Annual Technical Symposium, Proceedins, Anaheim, California, Sept. 1970.
6. Gabor D.: Holography 1948—1971, Prac. TEEE Vol. 60, no 6, 1972, 655-668.
7. Haines K. A., Hildebrand B. P.: Phys. Lett., 19, 1, 1965, 10-11.
8. Hildebrand B. P., Haines K. A.: Appl. Optics., 5 no 4, 1966, 595-602.
9. Leighty R. D.: ISP Comicion I Symposium, Stocholm, Sweden, 27-29 August 1974.
10. Smith H. M.: Principles of Holography, Wiley — Interscience New York, 1969.
11. Stroke G. W.: An introduction to coherent optics and holography Academic Press, New York and London, 1966.

*Генрик З. Ковальски, Анджей М. Скирмунт*

## ВЫБРАННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

### Резюме

В труде проводится наглядный рассмотр принципов оптической голографии, голографической интерферометрии и голографической аккумуляции и обработки информации.

Более широко рассматриваются вопросы голографической интерферометрии в действительное время с двойной экспозицией, а также представление по горизонталям трехмерных объектов.

Показываются некоторые потенциальные возможности использования голографии в разных областях науки и техники, а также приводятся примеры ее применения. Рассматриваемая проблематика представлена наглядно на рисунках и фотографиях.

*Henryk Z. Kowalski, Andrzej M. Skirmunt*

## SELECTED PROBLEMS OF THE OPTICAL HOLOGRAPHY

### Summary

Principles of optical holography, holographic interferometry and holographic accumulation and elaboration of information are presented visually in the paper.

Questions of holographic interferometry at the actual time with double exposition as well as contour presentation of three-dimensional objects are discussed in greater detail.

Some potential possibilities of the holography application in various fields of science and technique are indicated and some examples of application are quoted. Figures and photographs illustrate the problematics in question.