

Medida de vibrações por projeção estroboscópica de franjas para aplicações industriais

L. F. G. Dib¹, M. C. Henrique¹, M. T. Saita², E. A. Barbosa^{1*}

Resumo: A medida de vibrações é uma atividade extremamente importante em áreas de sistemas produtivos como controle de qualidade a processos de manutenção. Neste trabalho, foi proposta, estudada e desenvolvida uma técnica de medida de vibração fora-do-plano que se vale da projeção de luz estruturada. Esta técnica mostrou-se capaz de medir amplitudes de vibração na faixa de décimos de milímetro a poucos milímetros. A superfície vibratória analisada é obliquamente iluminada por franjas de interferência retas e paralelas produzidas por um interferômetro de Twyman-Green (TG) utilizando um laser emitindo em 532 nm como fonte de luz. As franjas foram visualizadas fazendo-se iluminação estroboscópica com a ajuda de um interferômetro de Fabry-Perot usado como modulador de amplitude. A vibração de uma placa polimérica vibrando com frequência de 80 Hz e amplitude 0,44 mm foi analisada.

Palavras-chave:

Medição de vibrações; projeção de luz estruturada; interferometria; estroboscopia.

Abstract – Vibration measurement is extremely important in production systems fields like quality control and maintenance processes. In this work, we proposed, studied and developed a measurement for out-of-plane vibration which takes advantage of structured light projection. This technique was able to measure vibration amplitudes in the range of tens of millimeters to few millimeters. The analyzed vibrating surface is obliquely illuminated by straight and parallel interference fringes generated by a Twyman-Green (TG) interferometer using a laser emitting at 532 nm as light source. The fringes were observed through stroboscopic illumination with the help of a Fabry-Perot interferometer as amplitude modulator.

¹Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa, CEETEPS, São Paulo, Brazil

²Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil - ebarbosa@fatecsp.br

Keywords:

Vibration measurement; structured light projection; interferometry; stroboscopy.

1. Introdução

Técnicas de medidas de vibração são largamente aplicadas na indústria. Usualmente, estas técnicas valem-se de instrumentos como os acelerômetros, que requerem o posicionamento de um transdutor sobre a superfície estudada. Apesar de altamente confiável, este tipo de técnica limita-se a análises ponto-a-ponto, exigindo uma grande coleta de dados para se obter o panorama geral da vibração do objeto. Além disso, devido à necessidade de contato entre o transdutor e a superfície, estas técnicas são inviáveis na medição de vibrações de objetos menores e de superfícies mais delicadas.

Técnicas ópticas têm se mostrado há décadas como uma ferramenta eficaz na medida de vibrações. Na indústria, há um crescente interesse por estas técnicas, particularmente nas áreas de manutenção preditiva, manutenção preventiva, controle de qualidade, entre várias outras. Ensaios como detecção de ruídos e balanceamento de rotores requerem uma cuidadosa e acurada análise de vibrações na determinação de ressonâncias, caso contrário, estas causam a deterioração de peças e dispositivos (OSTROVSKY, 1991; VEST, 1991). A maior parte das técnicas ópticas utiliza a interferometria, como a vibrometria Doppler a laser (VDL), presente em inúmeras aplicações (FRESCHI, 2003; FRESCHI, 2000). A técnica de holografia em média temporal e de *speckle* em média temporal permitem análises de campo inteiro e são limitadas à faixa micro-amplitudes de vibração. A faixa de amplitudes mensuráveis requer expedientes como o da estroboscopia (WATRASIEWICZ, 1968; HARIHARAN, 1987; YANG, 2014) e a modulação de fase do feixe referência (BARBOSA, 1997; LØKBERG, 1976).

Entende-se luz estruturada como um padrão de luz regularmente organizado no espaço, usualmente na forma de listras ou franjas de interferência retas e paralelas, tendo eventualmente outras formas. A incidência oblíqua e a projeção de luz estruturada são largamente utilizadas na reconstrução tridimensional (3D) de superfícies. Esta técnica encontra aplicações como reconhecimento facial (GIO, 2007), odontologia (MÚNERA, 2012; IRELAND, 2008), engenharia reversa (CHAO-HUI, 2005) e microscopia (YIN, 2015), entre várias outras. Imagens de padrões de luz estruturada coletadas por câmeras de alta velocidade também têm sido usadas para análises de processos dependentes do tempo: a vibração de baixa frequência de um objeto foi estudada projetando-se a sequência de padrões de franjas produzidas por uma rede em movimento a capturadas por uma câmera de alta velocidade (Fu, 2010); franjas geradas por uma rede de Ronchi (RODRIGUEZ-VERA, 2009) foram produzidas e analisadas por transformada de Fourier para o mapeamento de vibrações de uma placa de alumínio.

Na sua configuração básica, a projeção de franjas pura e simples não permite o estudo de fenômenos dinâmicos devido à perda de visibilidade do padrão luminoso nestes casos. Para que estes processos sejam analisados com câmeras de velocidade comum há a necessidade de se implementar arranjos para estabilizar o padrão de luz. Neste cenário, este artigo propõe uma alternativa simples para manter as franjas estáticas mesmo quando o objeto está vibrando, utilizando luz modulada em amplitude com o auxílio de um interferômetro de Fabry-Perot (IFB). A amplitude de vibração é então medida fazendo-se o escaneamento da fase do IFB, ou iluminando-se o objeto com uma frequência ligeiramente diferente da sua própria frequência de vibração. Na parte experimental, foi analisada a vibração de uma barra de fórmica excitada por um alto falante.

2. Referencial Teórico

Considere a incidência oblíqua de um padrão de franjas em uma superfície plana. As franjas são originadas de um interferômetro de Twyman-Green (TG) cujos espelhos estão levemente desalinhados, de modo que a distância entre duas franjas adjacentes e paralelas é d . Se o ângulo de incidência for θ , o padrão de franja projetado visto de uma direção perpendicular à superfície tem um período espacial de $d/\cos\theta$. Portanto, o padrão de franjas é escrito como

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{2\pi}{d} \cos\theta x\right),$$

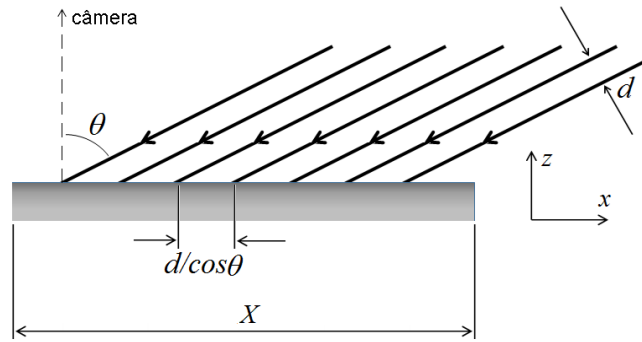
onde x é a direção perpendicular às franjas e I_0 é a intensidade da luz não modulada. A projeção da franja para duas posições da superfície vibratória com largura X é mostrada nas figuras 1a e 1b.

Se a superfície vibra ao longo da direção z , perpendicular à superfície, as franjas aparecerão para o observador como oscilando ao longo do eixo x . Da figura 1b conclui-se que um deslocamento de superfície ao longo do eixo z corresponde a um deslocamento máximo da franja lateral $\Delta x_{\max} = a \operatorname{tg}\theta$ ao longo do eixo x em relação à posição de equilíbrio. Assim, para uma vibração de uma superfície dada por $a \cos(\omega t)$ uma determinada franja obtém um deslocamento lateral $\Delta x_{ob}(t)$ dado por

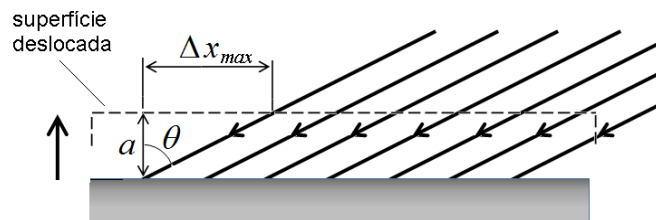
$$\Delta x_{ob}(t) = a \operatorname{tg}\theta \cos(\omega t + \phi_{ob}), \quad \text{Eq. (1)}$$

onde ϕ_{ob} é uma fase de vibração arbitrária do objeto.

Figura 1 - Projeção de franjas na superfície a – na posição de equilíbrio e b – após um deslocamento fora-do-plano a.



(a)



(b)

Fonte: os autores

Suponha-se que o feixe de laser com intensidade I_0 incidindo sobre o MI seja modulado em amplitude. Isso é realizado, por exemplo se o feixe se propaga através de um interferômetro Fabry-Perot (IFB) no qual um dos espelhos vibra de acordo com $A_{am} \cos(\Omega_{am} t + \phi_{am})$, onde A_{am} e Ω_{am} são respectivamente a amplitude e a frequência de vibração do espelho. Se ambos os espelhos têm uma reflectância R , a intensidade dependente do tempo da luz que emerge do IFB é dada por

$$I(t) = \frac{1}{1 + F \sin^2[(\delta_{am}/2) \cos(\Omega_{am} t + \phi_{am})]} I_0, \quad \text{Eq.(2)}$$

onde $\delta_{am} \equiv 4\pi A_{am} / \lambda$, sendo λ o comprimento de onda do laser, $F \equiv 4R / (1 - R)^2$ é a *finesse* do IFB e I_0 é a intensidade do feixe incidente. O termo dependente do tempo na equação (5) é escrito como

$$\cos[\delta_{am} \cos(\Omega_{am} t + \phi_{am})] = J_0(\delta_{am}) + 2 \sum_{N=1}^{\infty} J_{2N}(\delta_{am}) \cos[2N(\Omega_{am} t + \phi_{am})],$$

onde $J_i(\delta_{am})$ é a função de Bessel de ordem i . Se o espelho do IFB e o objeto vibrarem com a mesma frequência, ou seja, $\Omega_{am} = \omega$, o valor de A_{am} é definido de modo que o feixe na saída do IFB seja casada com a frequência do objeto vibratório. A duração do pulso é inversamente proporcional a F , de modo que um valor mais alto de *finesse* deve permitir um pulso relativamente curto ao custo da intensidade média da luz. A fase ϕ_{am} é escolhida a fim de selecionar a posição em que o objeto é iluminado pelo pulso de luz.

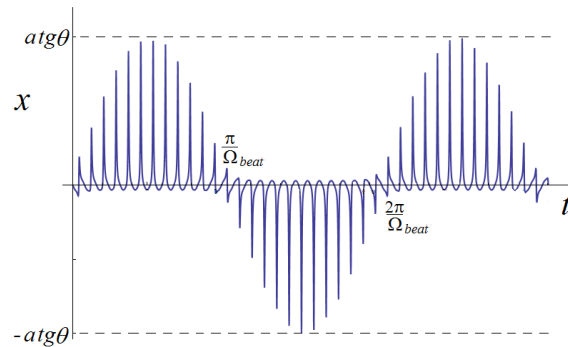
O princípio de medição é baseado em uma abordagem heterodina. Quando o laser é modulado com uma frequência Ω_{am} ligeiramente diferente da frequência ω da superfície vibratória, a posição de uma franja no padrão de interferência é descrita por

$$x(t) = \frac{a \operatorname{tg} \theta \cos(\omega t)}{1 + F \sin^2[(\delta_{am}/2) \cos(\Omega_{am} t + \phi_{am})]} \quad \text{Eq. (3)}$$

A equação (3) mostra que o interferograma projetado parece oscilar com uma frequência de batimento $\Omega_{bat} = |\Omega_{am} - \omega|$. A figura 2 traça a posição de uma franja em uma superfície vibratória para $R = 0.70$ e $\omega = 1.04 \Omega_{am}$, mostrando a posição $x(t)$ modulada no tempo por uma função de baixa frequência. A velocidade de franja zero ocorre para $x = \pm a \operatorname{tg} \theta$, que determina as posições extremas da franja e permite uma fácil medição da amplitude da vibração. Assim, a amplitude de vibração é dada por em função do deslocamento lateral máximo da franja $\Delta x_{máx}$ de acordo com

$$a = \frac{\Delta x_{máx}}{2 \operatorname{tg} \theta} \quad \text{Eq. (4)}$$

Figura 2 - Posição de uma superfície vibrando na frequência ω iluminado por um padrão de franja pulsado com frequência $\Omega_{am} = \omega/1.04$

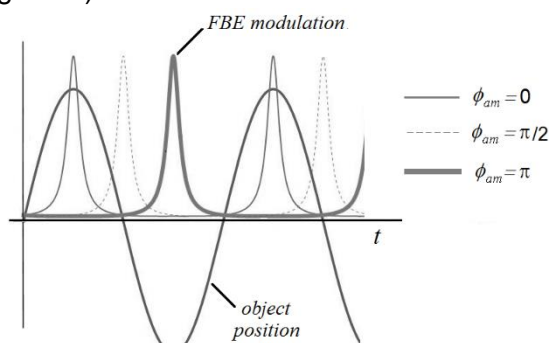


Fonte: os autores

Uma forma alternativa de medição funciona com o modulador IFB cortando a luz na mesma frequência em que o objeto vibra, conforme ilustrado na figura 3: a curva senoidal representa a posição de um determinado ponto P na superfície vibrante em função do tempo, enquanto as curvas pontiagudas mostram a intensidade da luz modulada na saída do IFB, para $F \approx 31$ e para diferentes fases. O pulso de luz ilumina P em seu deslocamento máximo para $\phi_{am} = 0$, ou seja, quando sua velocidade é zero (curva pontiaguda fina). Nesta condição, espera-se que a visibilidade do interferograma seja máxima. A fase do

modulador de amplitude IFB é alterada para que o objeto seja iluminado em outras posições. Quando a fase em relação à vibração do objeto for $\phi_{am} = \pi/2$ (curva tracejada), o interferograma iluminará as superfícies que se movem com velocidade máxima. Assim, devido à duração finita do pulso, a visibilidade do interferograma tem uma visibilidade menor ou mesmo ficar borrada. Quando o pulso de luz sofre uma mudança de fase total $\phi_{am} = \pi$ (curva espessa), o padrão de franja ilumina P novamente na velocidade zero, mas na posição extrema oposta, o que também leva a um interferograma de boa visibilidade que é deslocado de $\Delta x_{m\acute{a}x}$ do interferograma da figura 2. Este deslocamento está relacionado à amplitude de vibração a novamente de acordo com a equação (4).

Figura 3 - Pulso gerado pelo FBE (pontas grossas) iluminando a superfície vibratória quando ela está na posição positiva máxima (curva fina), quando a superfície está na velocidade máxima (curva tracejada) e quando a superfície está na posição negativa máxima (curva grossa).



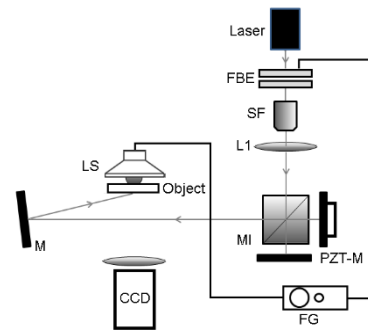
Fonte: os autores

3. Métodos

A figura 4 mostra o arranjo óptico utilizado. O feixe do laser passa pelo filtro espacial SF e focalizado pela lente positiva L1 nos dois espelhos do TG. A luz estruturada na forma de franjas de interferência retas e paralelas ilumina o objeto em estudo após ser direcionada pelo espelho M. O ângulo de incidência sobre a superfície é $\theta = 75^\circ$. Os espelhos do TG são ligeiramente desalinhados para permitir a formação das franjas. A figura 4 mostra também o modulador IFB no caminho do feixe antes de atingir o filtro espacial. Os espelhos em cunha do IFB têm $\sim 70\%$ de reflectividade e um deles é apoiado e movido por um transdutor piezoelétrico excitado pelo gerador de funções FG.

Adotou-se o método com duas frequências descrito na seção 2 para a medida de vibração de uma placa polimérica retangular de medidas 12 cm x 2,0 cm. A placa foi excitada pelo LS vibrando em 80,0 Hz e foi iluminada pelo padrão de franjas modulado pelo FBE em 79,8 Hz.

Figura 4 - Configuração óptica para o método estroboscópico. IFB é o modulador de amplitude Fabry-Perot.

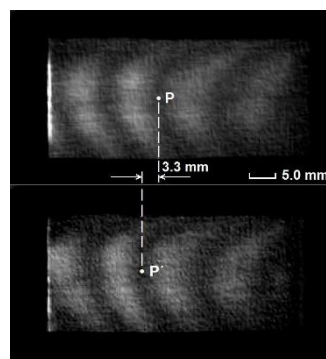


Fonte: os autores

4. Resultados e discussão

Na abordagem heterodina, como esperado, o padrão de franjas formado sobre a placa estudada move-se para a direita e a esquerda com uma frequência que permite determinar confortavelmente suas posições extremas. A Figura 5 mostra as duas configurações extremas do padrão de franjas com um período espacial médio de 10 mm. O ponto P é a posição extrema direita da franja central em um dado instante, enquanto P' é sua posição extrema esquerda. A distância entre eles é de 3,3 mm, de modo que de acordo com a equação (4) a amplitude de vibração é determinada como $a = 0.44 \text{ mm}$.

Figura 5 - Medição da amplitude de vibração por estroboscopia com interferograma de período espacial de 10-mm: a distância entre o ponto P no padrão de franja em sua posição extrema direita (figura superior) e o ponto P' na posição extrema esquerda (figura inferior) é de 3,3 mm.



Fonte: os autores

A medição heterodina foi muito mais viável do que a homodina devido às nossas condições experimentais. A diferença de fase entre as saídas de alimentação do alto-falante e do IFB em configuração só poderia ser controlada na forma de incrementos discretos, enquanto a forma ideal seria configurar a fase continuamente. Esses passos discretos de fase causam saltos no interferograma que às vezes levam a perda de referência e levar a resultados

ambíguos. Por outro lado, o método heterodino permite que as franjas se desloquem continuamente com uma velocidade que é convenientemente escolhida pelo ajuste da frequência do IFB.

O procedimento de medição descrito na figura 5 é mais adequado para o caso em que todos os pontos da superfície vibram com a mesma amplitude. Caso o mapa de vibração não seja uniforme, este procedimento requer um esforço manual maior, repetindo-o em diferentes pontos do objeto. Outra forma de determinação do mapa, que está além do escopo deste artigo, consiste em recuperar o mapa de fase (por exemplo, por métodos de passo de fase) e a fase não envolvida do objeto na configuração não perturbada e na configuração vibrante. O mapa de amplitude é obtido subtraindo ambas as configurações. Com este procedimento, as fases de vibração relativas também são determinadas.

As técnicas de projeção de franja têm o recurso interessante de permitir dimensionar a sensibilidade da medição ajustando convenientemente o ângulo de incidência. O uso do interferômetro de Twyman-Green é uma solução experimental muito eficaz, pois produz a luz estruturada e modula a fase para fazer o interferograma oscilar. Além disso, permite facilmente uma mudança conveniente do período espacial. Diferentemente de outros métodos de campo inteiro, a projeção do padrão de franja também permite a medição de superfícies que vibram como um todo, dispensando a existência de região nodal.

Uma vez que alguns objetos vibram em mais de uma frequência - os harmônicos de vibração - às vezes não é possível atingir um padrão de franja totalmente imóvel empregando a modulação de fase ou técnicas estroboscópicas, porque são aplicáveis a apenas uma frequência. Portanto, a visibilidade do interferograma congelado resultante é menor do que a visibilidade da superfície não excitada. Em alguns casos - dependendo das frequências e intensidades de excitação - os padrões de franja estáticos não podem ser obtidos.

Para o presente propósito, tanto o interferômetro Twyman-Green quanto o Fabry-Perot podem ser construídos para serem muito compactos e robustos, a fim de operar em ambientes um tanto barulhentos sem instabilidades prejudiciais; além disso, as amplitudes mensuráveis relativamente grandes permitem realizar medições de vibração de objetos em tais ambientes, sem a necessidade de colocá-los em tampos de mesa amortecidos. Essas características apontam para aplicações da técnica para realização de testes de aparelhos e máquinas vibratórias em ambientes industriais.

5. Considerações finais

Este artigo teve como objetivo demonstrar a viabilidade do uso de luz estruturada para medição de vibração. Nesta estrutura, os princípios para medição de vibração com base na projeção de franja foram propostos e discutidos. Foi demonstrada a medição de amplitudes de vibração na faixa de milímetros e décimos de milímetros, que é uma faixa que geralmente não é facilmente realizada por outras técnicas de campo inteiro. A faixa de frequência

mensurável é limitada apenas pelas responsividades PZT-M e FBE. Algumas dificuldades de ajuste eventualmente ocorrem quando a frequência de vibração do objeto corresponde à taxa de aquisição da câmera. Esta desvantagem pode ser superada devido ao fato de que as franjas e o casamento entre a frequência do objeto e a frequência de iluminação podem ser realizados observando-se diretamente as franjas na superfície, sem a necessidade da câmera. Neste caso particular, a câmera é útil apenas para aquisição e armazenamento de imagens.

Da forma como foi apresentada neste artigo, a técnica apresentada se limita a analisar a vibração de superfícies planas ou quase planas apenas. A análise de superfícies mais complexas exigiria um conhecimento prévio sobre sua forma e/ou um esquema de iluminação com mais de um ângulo de incidência. Essas possibilidades estão atualmente em estudo.

Referências

BARBOSA, E. A., MURAMATSU, M., Mapping of vibration amplitudes by time average holography in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystals, *Opt. & Las. Technol.* 29, 7 (1997) 359-364.

CHAO-HUI, L., HAI-TAO, H., HONG-WEI, G., MING-YI, C., S. XUAN, TAO, Y. Fringe projection measurement system in reverse engineering , *J. of Shanghai Univ.* 9, 2 (2005) 153–158.

FRESCHI, A. A., CAETANO, N. R., SANTARINE, G. A., HESSEL, R., Laser interferometric characterization of a vibrating speaker system, *Am. J. Phys.* 71,11(2003) 1121-1126.

FRESCHI, A. A., PEREIRA, K.A., AHMIDA, K. M., FREJLICH, J., ARRUDA, J. R. F., Analyzing the total structural intensity in beams using a homodyne laser doppler vibrometer, *Shock and Vibration* 7 (2000) 299–308.

FU, Y., Low-frequency vibration measurement by temporal analysis of projected fringe patterns, *Opt. Las. Engng.* 48 (2010) 226–234.

GUO, H., LIU, G., Approximations for the arctangent function in efficient fringe pattern analysis, *Opt. Exp.* 15 (6): 3053 - 3066.

HARIHARAN, P., OREB, B. F., FREUND, C. H., Stroboscopic holographic interferometry: measurements of vector components of a vibration, *Applied Optics* 26, 18 (1987) 3899-3903.

IRELAND, A. J., MCNAMARA, C., CLOVER, M. J., HOUSE, K., WENGER, N., BARBOUR, M. E., ALEMZADEH, K., ZHANG L., SANDY, J. R., 3D surface imaging in dentistry – what we are looking at, *British Dental Journal* 205, 7 (2008) 387-392.

LØKBERG, O. J., HØGMOEN, K., Vibration phase mapping using electronic speckle pattern interferometry, *Appl. Opt.* 15, 11 (1976) 2701-2704.

MÚNERA, N., LORA, G. J., GARCIA-SUCERQUIA, J., Evaluation of fringe projection and laser scanning for 3D reconstruction of dental pieces, *Dyna rev. fac. nac. minas* 171, 79 (2012) 65-73.

OSTROVSKY, Y. I., SHCHEPINOV V. P., YAKOVLEV, V. V., *Holographic Interferometry in Experimental mechanics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1991.

RODRIGUEZ-VERA, R., GENOVESE, K., RAYAS, J. A., MENDOZA-SANTOYO, F., *Vibration Analysis at Microscale by Talbot Fringe Projection Method*, *Strain* (2009) 45, 249–258.

VEST, C.M., *Holographic Interferometry* (Wiley, New York 1979).

YANG, G., SUN, C., WANG, P., XU, Y., High-speed scanning stroboscopic fringe-pattern projection technology for three-dimensional shape precision measurement, *Applied Optics* 53, 2 (2014) 174-183.

YANG, L.X, SCHUTH, M., THOMAS, D., WANG, Y.H., F. VOESING, Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem, *Opt. Las Engng.*47, 2 (2009) 252-258.

YIN Y., WANG M., GAO B.Z., LIU X., PENG X., Fringe projection 3D microscopy with the general imaging model, *Opt. Exp.* 23, 5 (2015) 6846-6857.

WATRASIEWICZ, B. M., SPICER, P., *Vibration Analysis by Stroboscopic Holography*, *Nature* 217 (1968) 1142–1143.