

스펙클 포토그라피와 畫像處理에 의한 面内變位 計測

* 韓 應 教

** 角 誠之助

*** 金 庚 錫

1987년 3월 3일 접수

Measurement of In-plane Displacement by Speckle
Photography and Image Processing

Han Eung Kyo Sumi Seinosuke Kim Koung Suk

ABSTRACT

Speckle photography is a very useful method for measuring in-plane surface displacement. In its basic form, the object to be studied is illuminated with a divergent laser beam, and a double exposure photograph of the object is recorded, on a fine-grain film or plate, before and after the object is deformed. The magnitude and the direction of the displacement can then be obtained by measuring the spacing and the direction of the Young's fringe, which is produced by probing the developed negative with an unexpanded laser beam, and consists of a pattern of parallel equi-spaced dark bands. In this paper, a hybrid optical and electronic image processing is described. Young's fringe on the viewing screen is observed by a TV-camera and the 2-D video signal is converted from analog to digital and transferred to the computer where the spacing and direction of the fringes are calculated. Several examples of application show that the displacement magnitude and direction can be determined with an accuracy of $0.1 \mu\text{m}$ and 0.1° , respectively.

* 漢陽大學校 教授

** 九州大學 航空工學科 教授

*** 漢陽大學校 大學院 精密機械工學科

NOMENCLATURE

- D : Amount of displacement in object plane
 F : Gap of fringe
 M : Photographing magnification
 L : Distance between object plane and screen
 R : Magnitude of scanning zone
 λ : wavelength of laser
 ds : Movement of speckle recording by double-exposure

1. 緒 論

Laser光을 拡散反射面に 照射될 때 그 反射面 안에 혹은, Lens로 結像된 物體面の 像안에 나타나는 작은 粒狀의 斑点모양(模樣)을 Speckle 이라고 한다.

이것은 서로 不規則하며 그러나 時間的 으로 는 定常的인 位相關係에 있는 多數의 光波가 干涉하고 發生하는 수도 있다. 이 Laser speckle은 이미 實用化되어있는 holograph等에는 noise도 있지만 逆으로 이것을 利用하여 物體表面의 面内變位를 測定하는 方法이 最近注目을 받고 있다.^{1) 2)} 이중의 代表的인 것이 speckle Holography로 이 方法의 長점이라고 하면 粗面物體의 非接觸測定이 可能하고 全視野의 變位情報가 한장의 写真 film, 사진감광판에 記錄되며 測定感度는 그때의 結像倍率에 의해 넓은 範圍도 調節되고 더욱이 光學系를 더없이 單純하게 하는 것 등이었다. 이 方法으로 어떤 점의 面内變位の 情報, 즉 變位の 크기와 方向을 求하는 데에는 擴散 Laser光으로 照明된 物體面을 變形前後로 二重露光攝影하고 現像된 negative (speckle gram)에 Laser beam을 照射하고 그때 發生한 young's fringe라고 부르는 平行等間隔의 干涉 fringe의 間격과 方向을 測

定하면 좋다. 그러나 얻어지는 것은 beam이 照射된 specklegram上的 點에 對應하는 物體面위의 點의 變位情報로 되므로 物體의 全面에 이르는 變位分布를 求하는데는 specklegram上으로 beam을 상세하게 走査하면서 測定을 行할 必要가 있고 많은 時間을 必要로 한다. 또한 fringe의 間격은 變位量이 크게됨에 따라 逆(逆)으로 적게하기 위함이며 目視에 의한 測定으로는 精度의 點에서 問題가 있고 더우기 變位方向을 표시한 fringe 方向을 精度 좋게 測定하는 것은 容易하지 않다. 이때문에 計測의 自動化가 여러가지 시도되고 있지만 우선 汎用性이 있는 方法은 發表되지 않고 있다. 本論文에서는 young's fringe를 TV camera로 二次元畫像으로 하여 그대로 収録하고 變位の 크기와 함께 方向도 計算機로 解析하는 畫像處理 system의 開發과 그 適用例에 대해서 報告한다.

2. Speckle holography

2-1 Speckle

Laser光을 擴散反射면에 照射하고 앞에 screen을 두면 明暗의 粒狀斑点 즉 speckle로부터 反射 pattern이 생기지만 이것은 回折界의 Speckle Pattern이라고 부른다. 이때의 speckle의 크기는 $\sigma = 1.22\lambda L/R$ 로 λ 는 Laser波長, L은 物體面과 screen사이의 距離, R은 照射구역의 크기이다. Fig- 1에 표시한 것처럼 Lens를 利用하여 Laser照射面을 結像할 때에는 物體像에 겹치게 speckle이 發生한다. 이것을 像界의 speckle이라고 부르며 그 크기는 $\sigma = 0.61\lambda/\sin\beta$ 또는 $\sigma = 1.22(1+M)\lambda F$ 로 주어진다. M은 攝影倍率 F는 Lens의 f number이다

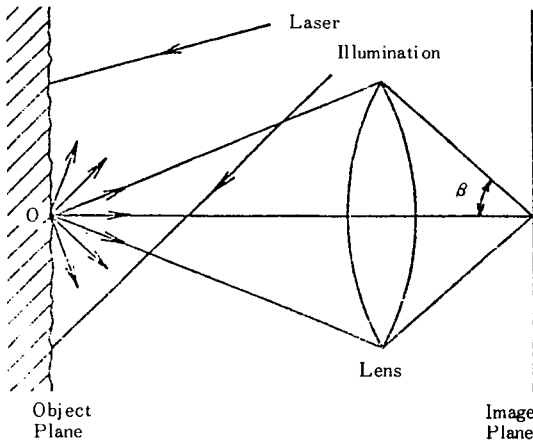


Fig. 1. Closing image system of image boundary speckle pattern

2-2 原理

(a) 結像系

像界 speckle pattern의 光学系에 있어서 像面의 位置에 写真 film 혹은 鍵盤을 설치하고 speckle photography의 結像系로 된다. 이것은 결국 camera로 Laser 照射面을 撮影하는 것과 다르지않고 變形前後로 二重露光撮影을 하면 物體表面의 各点 面内變位를 speckle을 移動하고 記錄하는것이 可能하다. 露光, 現像된 negative (음화용의 flim)가 specklegram이다.

(b) Young's fringe에 의한 變位計測

二重露光된 specklegram의 任意点에 가느 다란 Laser beam을 照射하면 物體가 變形하기前의 speckle과 變形에따라 移動된 speckle은 二重 slit로하여 作用하고 young의 干涉fringe와 같은모양의 原理로 平用等間隔의 干涉 fringe가 發生한다. 写真-1은 이-例이다.

지금, 物體面위의 變位量을 D 撮影倍率을 M 이라하면 二重露光에 의해 記錄된 speckle의 移動量 ds와의 사이에는 다음 關係가 成立한다.

$$D = ds/M \dots\dots\dots (1)$$

또 fringe 간격을 F라고 하면 다음식이 成立한

다.

$$F = \lambda L / ds \dots\dots\dots (2)$$

(1)式, (2)式에 의해

$$D = \lambda L / FM \dots\dots\dots (3)$$

따라서 fringe 間隔을 몇가지의 方法으로 計測하면 物體面의 變位量을 求할수 있다. 또한 干涉 fringe의 方向은 變位方向에 直交하는 것으로부터 變位方向도 同時에 求해진다.

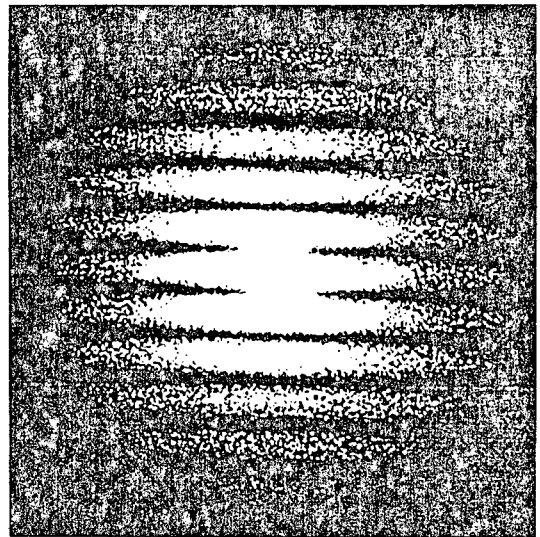


Photo 1. Young's fringe.

3. 画像収録 System^{4) 5)}

画像解析을 위해 機器構成을 fig-2에 표시한다.

종래에는 prism을 이용하고 screen위에 young's fringe를 차례로 회전시키며 TV camera⁴⁾나 一次元 image sensor로⁵⁾ 収録하여 解析하는 方法이 報告되어 있지만 이러한 方法으로는 機械인 補助장치를 必要로하고 収録時間도 길어서 汎用性이 부족하다.

이것에 對하여 本 system의 특징은 目視또는

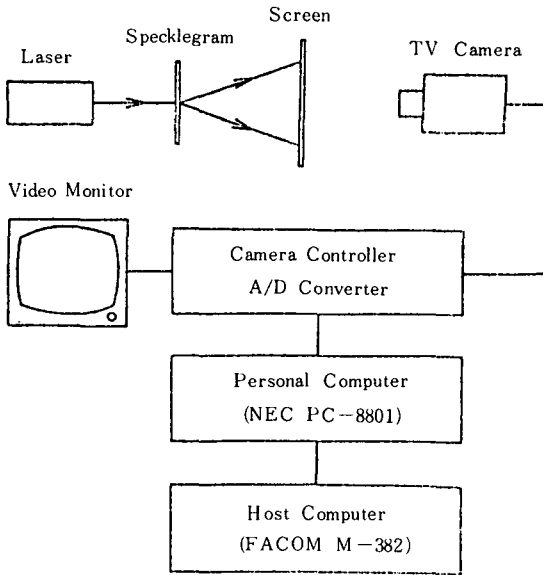


Fig. 2. Image processing system

写真 대신에 TV camera를 이용하여 screen 위의 young's fringe를 그대로 二次元画像 data로 하여 収録하고 計算機處理로부터 變位量과 함께 變位方向도 一括하여 求하는 點도 있고 더없이 一般的인 方法도 있다.

画像를 personal computer에 収録하기 위하여 구체적인 장치 및 절차는 이하와 같다. 半透明의 screen 상에 생기는 young's fringe를 computer用 camera로 撮影하고 얻어진 analog data는 camera unit로 보내어져 A/D 變換되고 parallel I/O interface를 끼워 personal computer (NEC製, PC-8801)로 轉送된다. 이 system에는 1画面에 대하여 縱, 橫 동시에 256, 512, 1024 画素의 어느것을 選擇할수 있지만 後에 나타내 보이는 適用例에는 解像度를 그다지 높일 필요는 없다. 또 處理速度의 面으로부터도 有利하므로 256×256 画素의 解像度를 利用했다. 그런데도 画像data는 各画素당 6 bit, 64階調의 digital data도 상당히 크고 좌표 변환등의 後處理를 Facom으로 행하는데 處理에 要하는 時間등의 面으로 問題가 있다. 그래

서 프로피디스크를 中間媒體로하여 画像 data를 大型計算機 center 위의 data set로 變換하여 그후 解析을 行한다. 역시 大型計算機에 data를 轉送하는 다른 方法으로하여 Facom을 intelligent 瑞末로 하여 使用하고 TSS아래서의 file 轉送에 의한 方法도 생각되지만 多點의 測定에는 轉送에 必要한 時間이 一般的으로 길게된다.

4. 画像解析法

Young's fringe의 方向이 變位方向과 直交하고 fringe 間隔이 變位量에 反比例하는 것으로부터 變位方向과 크기가 결정된다. 그런데 二次元画像 data로 하고 収録된 young's fringe를 輝度を 垂直軸으로잡고 二次元表示된 例가 fig-3이다.

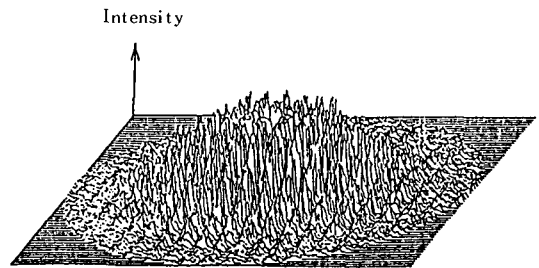
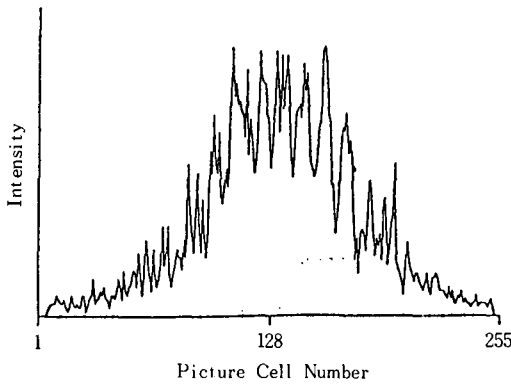


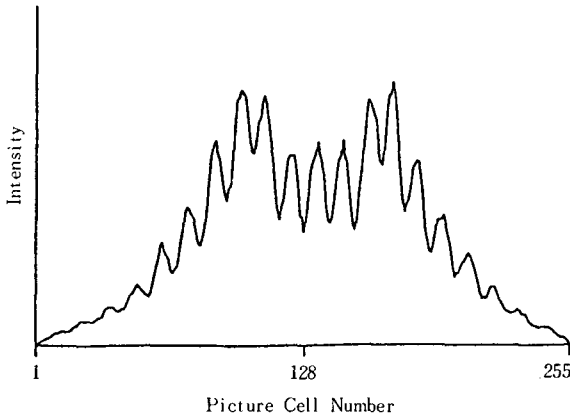
Fig 3. Three-dimensional display of young's fringe collection by image data

이것을 보면 等間隔直線狀의 young's fringe에 speckle noise가 중첩하여 存在하고 있는것을 알 수 있다. 이것은 fig-4(a)에 나타낸것처럼 fringe에 直交하는 전체의 走査線에 따른 輝度分布를 求해보면 보다 정확하며 이 noise는 speckle gram自體가 拡散板에 作用을 하고 回折界의 speckle을 發生하기 위함이다.

그래서 fringe에 平行한 方向에 輝度を 반복, 합하여 平均化處理를하고 random한 noise成分을 제거한 것이 fig-4(b)이다.



(a) Brightness distribution by unity injection line



(b) Averaged processing brightness distribution to parallel direction with fringe

Fig 4. Brightness distribution of Young's fringe

이와같은 data에 의하면 容易하게 fringe 間隔을 발견할 수가 있다. 具體的으로는 大型計算機에 보내어진 畫像 data에서부터 以下같이 求한다.

4-1 變位方向의 解析

Fig-5에 나타낸 것처럼 speckle gram上에 X軸, Y軸을 잡는다. 이 fig에서는 Laser beam을 照射된 speckle gram上的의 點에 對應하는 物體面上의 點의 變位量과 變位方向이 X軸과 이룬 解度 θ 와의 說明의 便宜上 speckle

gram 상에 거둬표시하고 있다. 또 fig 표시 처럼 screen 상에 發生된 young's fringe의 方向은 θ 方向과 直交한다.

Speckle gram上에서 beam을 走査함에 따르는 θ 즉 screen 上의 fringe의 方向은 一般的으로 變化하고 X, Y 方向에는 一致하지 않는다. 그런데 畫像 data는 各 画素에 있어서 離散화된 輝度情報가 二次元配列 $1NT(i, j)$ 에 收納되어지게 된다. i, j 는 각각 X, Y에 對應하는 line 혹은 画素이다.

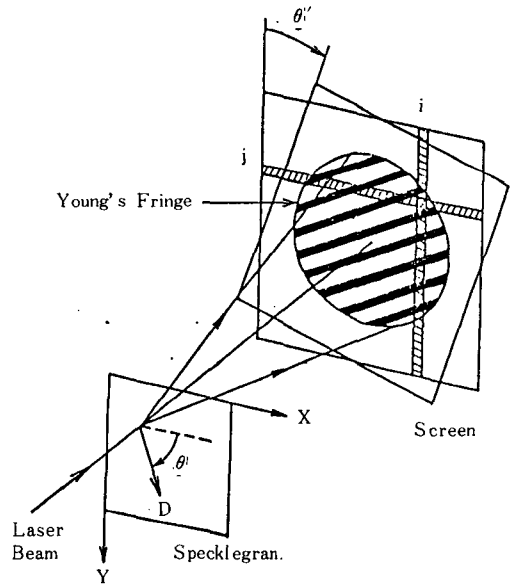


Fig 5. Coordinate system

여기서 young's fringe 즉 畫像은 움직이지 않고 fig에 나타낸 것처럼 座標系를 中央의 點($i = 128, j = 128$)의 부근에 θ' 만 回轉된 配列을 $1NT'(i', j')$ 라고 하면 이때 다음의 關係가 成立한다.

$$\begin{Bmatrix} i' \\ j' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i-128 \\ j-128 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 128 \\ 128 \end{Bmatrix} \dots\dots(4)$$

이 θ' 가 정확히 θ 와 동일하다고 할때에 i' 方向이 young's fringe에 垂直한 方向이다.

이때 一次元配列

$$\text{INTSUM}(i') = \sum_{j'=1}^{255} \text{INT}'(i', j') \dots\dots\dots (5)$$

은 fringe에 平行한 方向의 画素에 对하여 輝度を 반복해서 합하게 되면 이때 다음式으로定義되는 contrast 評價量은 最大直를 갖는다.

$$C = \sum_{i'=1}^{254} \{ \text{INTSUM}(i'+1) - \text{INTSUM}(i') \}^2 \dots\dots\dots (6)$$

그러므로 C는 最大로되는 θ' 로부터 變位方向을 구한다.

4-2 變位量的 解析

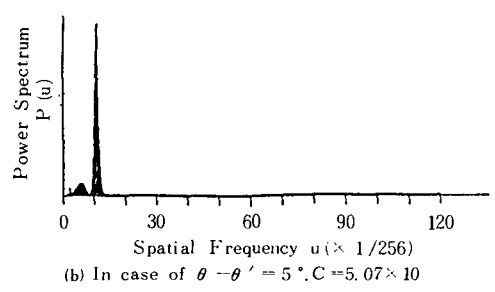
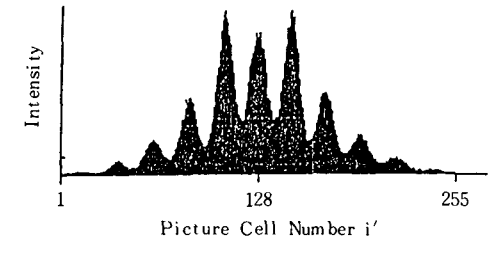
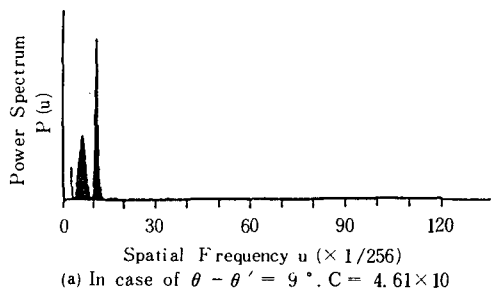
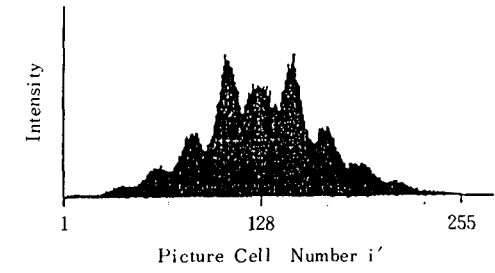
앞에 記述된 young's fringe와 平行인 方向에 平均化된 輝度分布 INTSUM(i')는 이미 거듭 합하여 平均化함에 speckle noise가 상당히 除去되지만 實際에는 또 speckle noise의 중첩에 의한 영향이 남는다. 그러므로 이것을 제거하고 週期成分으로 어느 young's fringe의 fringe 間隔을 구하기 위하여 平均輝度分布 INTSUM(i')의 power-spectrum P(u)를 FFT法으로 부터 求하게 된다. 이 power-spectrum은 fringe 間隔에 対応하는 明確한 peak를 가지고 그 空間周波數 up로부터 収録 data의 画素上의 fringe 間隔F'가 $F' = 1/up$ (單位: 画素)로하고 求한다. 實際의 fringe 間隔F는 이미 알고있는 길이d의 物體를 撮影하고 対応하는 画素數N을 測定하여 求한 scale factor $S = d/N$ (單位: mm/画素)을 F'에 곱하는 것으로 구한다. F가 구해지면 (3)式으로부터 變位量 D가 얻어진다.

5. 測定例

5-1 剛體移動變位の 測定

平板을 試驗片으로하고 光軸과 直交하는 方向

에 micrometer 付의 微動裝置에 剛體移動變位 $40\mu\text{m}$ 눈때의 young's fringe를 画像解析했다. 얻어진 平均輝度分布 INTSUM (i')와 power-spectrum P(u)의 分布를 fig 6-(a)~(c)에 표시한다. (a)는 $\theta - \theta' = \rho$, 즉 座標系를 回轉된 角度와 變位方向과의 사이에 ρ 의 엇갈림이 있는 경우이며 (c)는 $\theta - \theta' = 0^\circ$ 에서는 兩者가 一致된 경우이다.



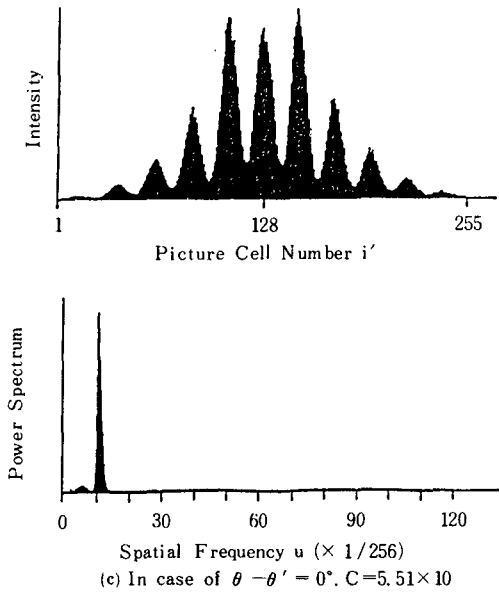


Fig 6. Brightness distribution and power spectrum of Young's fringe in rigid body movement displacement

(a)로부터 (c)로 향한만큼 平均輝度分布는 명료하게 凹凸을 나타내어 contrast 評價量 C의 값은 증가한다. 더우기 power-spectrum은 fringe 間隔에 対応된 곳에서 예민한 첫동작을 나타내고 精度 좋은 fringe 間隔을 測定하는 것을 알았다.

5-2 剛體回轉變位の 測定

光軸에 平行한 軸 주위에 回轉할 수 있는 供試體로 하고 利用하여 微動裝置에 의하여 剛體回轉變位를 준다. 이경우는 円板의 中心으로부터 어느 半徑方向에 走査하여도 回轉角에 따른 一定의 變位句配가 있다.

Fig-7은 3.3 mrad의 剛體回轉變位 준 경우의 young's fringe를 畫像解析하는 것과 동시에 目視測定도 행한 兩者의 比較를 行한 結果이다. 測定結果의 偶然誤差상대로부터 보면 畫像解析의 쪽이 目視測定보다 精度가 좋다. 특

히 fringe 間隔이 적다. 즉 變位가 큰 경우에도 좋은 精度로 測定가능한 것을 알수 있다. 이러한 것은 畫像解析에 있어서는 識別 가능한 fringe 間隔이 작다. 그러므로 測定 가능한 變位上限이 目視의 경우보다 크다는 것을 意味하고 있다.

變位 158.1 μm의 경우에서의 平均輝度分布와 power-spectrum으로부터 容易하게 fringe 間隔을 求하는 것이 가능하다는 것을 알수 있다. 그런데 一般的으로 變位方向은 未知이므로 0°로부터 180°에 이르기까지 順序대로 θ'의 값을 變化 시켜서 (6)式 C의 값을 求하여 그 最大値를 주는 θ'값으로 하고 θ의 값을 알아낸다. fig-9는 剛體回轉円板 위의 두점의 young's fringe에 대하여 0.1°씩으로 이것을 행한 例이다. 變位가 큰 경우의 쪽이 C의 分布에 있어서 peak幅이 좁게되어 變位方向의 測定도 容易하다는 것을 알았다.

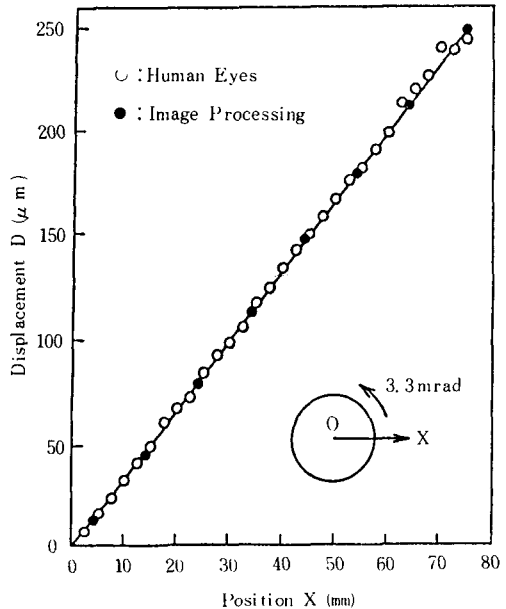


Fig 7. Comparison of measurement result of rigid body gyration displacement by image processing and human eyes

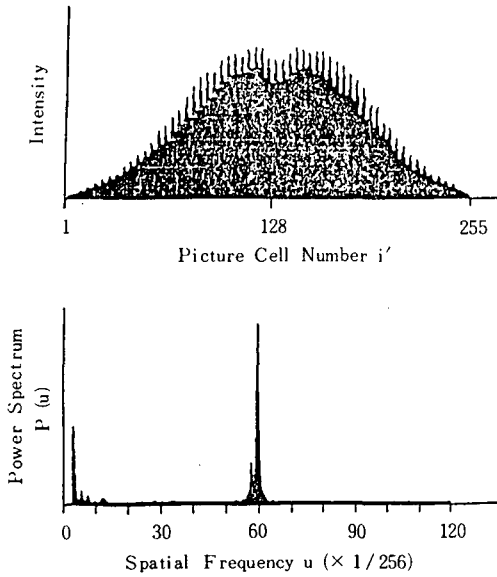


Fig 8. Brightness distribution of Young's fringe and power spectrum in case that displacement is comparatively long

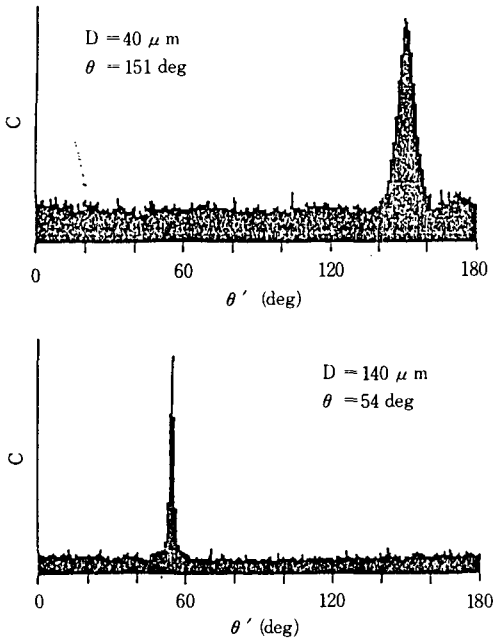


Fig 9. Variation by coordinate revolution angle in evaluation amount of Young's fringe contrast

6. 結 論

TV camera와 personal computer를 이용하여 young's fringe를 즉시 二次元画像data로 하여 収録하고 大型計算機로 画像解析 하는 方法을 開發했다. 이 方法은 fringe와 平行한 方向으로 平均化된 輝度分布의 power-spectrum 으로부터 fringe間隔을 測定하기 위해 종래의 目視에 의한 方法과 比較하여, 精度나 測定可能한 變位의 上限에 있어서 우수하며 특히 大變位の 경우에서도 높은 精度로 測定이 가능하다. 또 變位方向에 있어서도 精度가 높고 容易하게 測定가능하다는 것이 명확하게 되었다. 画像解析에 있어서 數值計算은 九州大学 大型計算機 Center의 FADOM, M-382를 이용하여 연구했던 것을 첨가하여 적는다

7. 參考文獻

- 1) 角誠之助：構造強度解析におけるレーザの応用, 日本航空宇宙学会誌, 第25巻, 第281号 (1977), pp. 259~268.
- 2) 角誠之助：構造と材料強度のレーザ 応用計測, 日本機械学会誌 第82巻 第733号 (1979), pp. 1320~1325
- 3) R. K. Erf : Application of Laser Speckle to Measurement, Laser Application vol. 4, Academic Press (1980)
- 4) 角誠之助, 今城昭彦：画像解析システムを用いたスプツクル・ホットダファイによる 熱変形測定, 日本航空宇宙学会西部支部講演会講演集 (1983), pp. 25~28.
- 5) 角誠之助, 今城昭彦, 井藤俊吾：画像解析システムを用いたスプツクル・ホットグラフィにとる高温下の変形測定, 非破壊検査 (昭和58年度秋季大会講演概要), 第32巻, 第

- 9号(1983), pp. 804~805
- 6) B. Ineichen, P. Eglin and R. Dandliker :
Hybrid Optical and Electronic Image
Processing for strain Measurement by
Speckle Photography. Appl. Optics, Vol.
19, No.13 (1980). pp. 2191~2195
- 7) 山一郎 : 스팩클寫眞의 自動解析裝
置의 開發と 應用, 第15回応力. ひずみ測
定 シンポジウム講演集 (1982). pp. 37~40.