Moiré Pattern のコントラストに関する考察と実験 (その 1)

An experiment and a consideration about Moiré

Patterns contrast. (1)

by Mitsuyoshi Kureya.

呉屋充庸*

Studies and experiments to obtain contour lines of a non-topographic object have been conducted for some time, especially in the use of Moiré Pattern techniques by H. Takasaki and D. M. Meadows etc.

In these days, an evaluation of Moiré Pattern's photographs and a standardization of Moiré Pattern techniques must be considered. The author plans to study these problems and will be concerned with a contrast of Moiré fringes.

To analyze slit (or grid) geometry, a rectangular wave function is adopted for the transmission function. There are two reasons for adopting the rectangular wave function; namely, there exists a ratio between the width of the string and the space, and the distribution of light through a series of slits onto the object is observed as a rectangular wave. If only a sinusoidal function for a series of slits is used to express the transmission function, the effect of the ratio mentioned above can not be discussed in detail. The ratio K affects the brightness of the picture of Moiré Pattern and the noise introduced by these slits, or the grid.

In this paper, the ratio K mentioned above is defined by [Gap's width]/[Black line's width], and if K is contained within the transmission function, then the effect of the ratio K on the contrast can be discussed and some results shown.

1. ま え が き

Non-Topographic な対象物の非接触三次元計測に関する研究は、かなり古くから行われている。1960年代においては、丸安、大嶋等による Stereo Photography の応用によるものが主であり、筆者も1963年以降、Ortho-Contour Photography という題目で非接触三次元計測に関する報告を行った。1970年代になると、高崎や、或は D. M. MEDOWS 等によって Moiré Pattern による三次元計測の報告^{1, 2}が行われ、その後多くの分野でモアレ縞に関する研究が盛んになった。Moiré 縞写真の特徴は、物体表面の起伏に関する多くの情報をその写真内にもっていることである。そこから等高線群を抽出したり、或は必要とする各種の計算処理を行うことにより三次元計測の目的を果すことができる。この目的を果すためには、なるべく明瞭な Moiré fringe を得ることが好ましい。すなわち、その後どのような手段を用いて Data の処理を実行するにしても、よりよい

写真を得ることが必要である。

明瞭な縞模様を得ることにかかわる問題点についての報告、すなわち被写体表面における光の吸収とか、反射に関する問題とか、格子条の材料或はレンズに関する検討等に関する報告は高崎の報告²や B. DRERUP の報告³を除いてはあまり見られない。Moiré 写真を使用した三次元計測の精度を向上させるとか、適用分野に応じた標準化の問題を考えるとときには、モアレ縞のコントラストに関する問題もそのなかにふくまれる。すなわち、これらの問題についての実験例や経験を整理する必要があると考え、今回の考察と実験を行うことにした。

2. Moiré 縞の明瞭度に影響を与えると考えられる因子について

写真フィルム上における等高線上の光の強度に関する式 3-1-3 の係数の内容、すなわち

- (1) 被写体表面における光の反射
- (2) 物体-レンズ間の距離 (レンズの写界深度にも関係してくる)
- (3) 被写体表面の起伏

*群馬工業高等専門学校
「写真測量とリモートセンシング」vol. 17, No. 4, 1978

(4) 光 源

などが先ず挙げられる。また格子投影型にしても、格子照射型にしても実際には格子を構成する黒線と隙間との間に一定の比（今後Kで表わす）が存在する。この割合は当然、等高線上の光の強度と他の部分の明るさに関係すると考えられるので一つの因子となる。また格子条の材料とか、その表面の状態によっても写真のできばえが変わってくる。そこでつぎの(5)と(6)を因子のなかに加える。

(5) 格子条の光の吸収・反射（String を使用した場合、燃られているものか、燃られたものでないかによっても異なった結果が得られる）

(6) 間隙率K

モアレ縞のコントラストに実際に影響を与えるのは、実効的な間隙率であるが、はじめは取扱いを簡単にするため、格子自体のもつ間隙率によって考察する。

3. 間隙率 K について

上に列挙した因子のなかで、いままで論議されていなかった格子条間隙率Kは、強度伝達関数を誘導する場合に現われてくる値であるから理論式誘導の原点から記述する。また先にも触れたが、被写体表面の傾斜（或は曲率）や、位置の関係もいれてKの値と Moiré 縞の強度の関係を誘導するのが一般的であると考えが、被写体の表面の状態は被写体自体に従属するものであり、また格子条の形状に左右される実効的なKの値をとり入れることは問題を複雑にするので、ここでは格子のもつ（格子条の隙間の配分から発生する割合）Kの値が、強度伝達関数にどのように入りこんでくるかと言う事から出発する。

Fig. 1 The relation between Period and Light intensity

D. M. MEADOWS 等も光の強度伝達に矩形波を用いた場合について述べているが、ここで扱うKについては言及していない。所謂光の強度と位相に関しては、 $-\pi \sim 0$ に対して光の強度を 0, $0 \sim \pi$ の範囲に対して光の強度を 1 とした Fourier Series によって扱っている。また格子投影型の場合、光源側から被写体上に投ぜられるスリット群像（或は格子像）の光の強度分布は矩形波として扱うほうが現実的であり、殊にフィルム直前にセットするスリット群は、矩形波として表わすのがよい。そこで Fig. 1 で示すようにスリットのピッチ p_0 をつぎのように K : 1 に内分して取り扱う。

（格子条の巾）：（隙間巾）= K : 1

3.1 D. M. MEADOWS 等の Contour-term.

Fig. 2 Moiré contouring system by D.M. Meadows

Fig. 2 において、光源と観測者（或はカメラ）の格子からの高さを等しくおき、光源とカメラを距離 d だけ離れた場合について格子 Shadow の強度伝達をつぎの式で与えている。

$$T(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} g(2\pi x/p) \quad \cdots \cdots (3-1-1)$$

ここで、 $g(2\pi x/p)$ は任意の周期関数である。さらに

$$C = (I_0/4r^2) \cos \phi(x, y, z) \quad \cdots \cdots (3-1-2)$$

とすれば、等高線化される物体表面の光の強度は

$$I(x, y) = C \left\{ 1 + g \left[\frac{2\pi hx}{p(h+z)} \right] \right\} \left\{ 1 + g \left[\frac{2\pi(d \cdot z + hx)}{p(h+z)} \right] \right\} \quad \cdots \cdots (3-1-3)$$

によって与えられ、ここで $g(2\pi x/p)$ は Fourier Series

$$g = \left(\frac{2\pi x}{p} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \sin \frac{2\pi n x}{p} + b_n \cos \frac{2\pi n x}{p} \right) \quad \dots\dots\dots (3-1-4)$$

である。これを式 (3-1-3) にいれて整理し、 z のみに左右される項によって与えられる

$$f(z) = C \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2} (a_n^2 + b_n^2) \cos \frac{2\pi}{p} \left(\frac{n \cdot d \cdot z}{h+z} \right) \right] \quad \dots\dots (3-1-5)$$

が、等高線を表わすというように式 (3-1-5) を誘導している。さらに、強度伝達関係が矩形波であるような格子を用いることが実験的には都合がよいとして矩形波格子を

$$T(x) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{2\pi n x}{p} \quad \dots\dots\dots (3-1-6)$$

によって与え、その場合の $f(z)$ をつぎのように示している。

$$f(z) = C \left[1 + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos \frac{2\pi}{p} \left(\frac{n \cdot d \cdot z}{h+z} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (3-1-7)$$

3.2 間隙率 K をいれた場合

本報告の趣旨を明確にするために、3.2 で D. M. MEADOWS 等による式の誘導に触れたが、一般に周期を 2π とすれば、Fourier Series は

$$f(\varphi + 2\pi) = f(\varphi)$$

であり、 $f(\varphi)$ に関する積分が存在するとすれば $f(\varphi)$ は

$$f(\varphi) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\varphi + b_n \sin n\varphi)$$

によって表わされる。ここには

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) \cos n\varphi \cdot d\varphi \quad (n=0, 1, 2, \dots)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\varphi) \sin n\varphi \cdot d\varphi$$

なる関係がある。

ここで、先に触れたごとく

$$\begin{aligned} (\text{格子条巾}) : (\text{隙間巾}) &= K : 1 = (2\pi - \theta_s) : \theta_s \\ &= (\bar{p}_o - \bar{p}_s) : \bar{p}_s \quad \dots\dots (3-2-1) \end{aligned}$$

とおけば (参照 Fig. 1)

$$\theta = \frac{K-1}{K+1} \pi \quad \dots\dots\dots (3-2-2)$$

という関係があり、スリットを通過した光の強度分布を

$$T(\varphi) = \begin{cases} 0 & (-\pi \leq \varphi < \frac{K-1}{K+1} \pi, \varphi = \pi) \\ +1 & (\frac{K-1}{K+1} \pi \leq \varphi < \pi) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3-2-3)$$

のように定めれば、 a_n や b_n は

$$a_o = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\frac{K-1}{K+1} \pi} 0 \cdot d\varphi + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{K-1}{K+1} \pi}^{\pi} 1 \cdot d\varphi = \frac{2}{K+1} \quad \dots\dots\dots (3-2-4)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{K-1}{K+1} \pi}^{\pi} \cos n\varphi \cdot d\varphi = \frac{-1}{n\pi} \sin \frac{n(K-1)\pi}{K+1} \quad \dots\dots\dots (3-2-5)$$

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{\frac{K-1}{K+1} \pi}^{\pi} \sin n\varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{n\pi} \left[\cos \frac{n(K-1)\pi}{K+1} \pi \right. \\ &\quad \left. - \cos n\pi \right] \quad \dots\dots\dots (3-2-6) \end{aligned}$$

のように与えられ

$$\begin{aligned} T(\varphi) &= \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\varphi + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\varphi \\ &= \frac{1}{K+1} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n\pi} \sin \frac{n(K-1)\pi}{K+1} \cos n\varphi \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\pi} \left[\cos \frac{n(K-1)\pi}{K+1} - \cos n\pi \right] \sin n\varphi \quad \dots\dots\dots (3-2-7) \end{aligned}$$

を得る。この式において $K=1$ とすれば先に引用した式 (3-1-6) と全く同一のものを得る。そこで矩形波関数として式 (3-2-7) を用い、物体表面上に投影された格子条の像 $Q(x, y, z_1)$ の位相を φ_1 、(Fig. 3 参照)、カメラ側の格子に対応する Q 点の位相を φ_2 とすれば、 $Q(x, y, z_1)$ 点を含む等高線の存在する物体表面の光の強度は

$$\begin{aligned} I(x, y) &= C' \left[\frac{1}{K+1} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\varphi_1 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \right. \\ &\quad \left. \sin n\varphi_1 \right] \left[\frac{1}{K+1} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\varphi_2 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\varphi_2 \right] \quad \dots\dots\dots (3-2-8) \end{aligned}$$

ここで C' は $C' = (I_o/r^2) \cos \phi(x, y, z)$ である。さらに展開してつぎの式を得る。

が、どのような収束値を示すかを調べなければならない。そこで式(3-2-5)と式(3-2-6)から

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n^2 + b_n^2}{2} = \sum_{n=1}^n \frac{1}{n^2 \pi^2} [1 - (-1)^n \cos \frac{n(K-1)}{K+1} \pi] \dots\dots\dots (4-1-1)$$

K \ N	162	188	2160	2460	2780	3120	3480	3860	4260
0.3333	0.1869	0.1870	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874
0.5000	0.2216	0.2217	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221
1.0000	0.2494	0.2495	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499	0.2499
2.0000	0.2216	0.2217	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221	0.2221
3.0000	0.1869	0.1870	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874	0.1874

Table. 1

$1/(K+1)^2$ の値をベースとして成りたっている。したがって、その値を加えて式(3-2-11)のC'に乘ぜらるべき〔 〕内の値を示すと

Kの値	3.0	2.0	1.0	0.50	0.33
〔 〕の値	0.25	0.33	0.50	0.66	0.78

のようになる。しかし、実際にはノイズ項も存在するので、コントラストとしての評価は式(3-2-13)で示されるような物理的意味をもつ方法によって評価されるべきである。式(3-2-13)による評価は実験的に行ない。その結果は今後の報告の中で示す。

Fig. 4 Stereo-camera used for the projection type

4.2 格子投影型についての実験

Fig.4に示されている一組の立体写真用カメラを用いた。すなわち一台のカメラを光源部とし、他の一台のカメラを撮影カメラとした。この立体写真用カメラのレンズは、ZEISS TESSAR、焦点距離fは150mm、F6・3である。またLetrasetを硬調フィルムに焼きつ

を求めて、Kを0.3、0.5、1.0、2.0、3.0と変え、それぞれに対する $\Sigma(a_n^2 + b_n^2)/2$ の値がnを増大した場合にどのように変化するかを確かめる。その計算値をTable.1に示す。出発点において強度伝達関数を0～1の間の値をとる矩形波としたのであるから、等高線上の強度の絶対値はノイズ項を除いて考えれば、

けて格子を作成した。使用したレトラセットは、25・50 lines/cmの10、20、30、40、50%と16・75 lines/cmの10、20、30、40、50%というそれぞれ5種の2系列、計10種である。ここに使用されている%の値はピッチに対する黒線巾の割合を百分率で示したものであるが、これらを使用して作成した格子は白黒反転している。その上作成したものを工場顕微鏡等で実測しなければ実際の割合を示すことにならないので、実測したKの値を各系列について示すとつぎのようになる。

25・50 lines/cmの系列から作成したものは、ピッチ：0.40mm、Kの値：1・3(50%)、1・8(40%)、2・1(30%)、3・6(20%)、7・5(10%)

16・75 lines/cmの系列から作成したものは、ピッチ：0・61mm、Kの値：1・2(50%)、1・5(40%)、2・3(30%)、4・3(20%)、12・6(10%)

ここで()内の値は、レトラセットに表示されている百分率。

このようにして作成した格子をFig.3のように通常フィルムまたは写真乾板をセットする場所に配置して格子投影型を構成する。すなわち同じKの値をもつ一組の格子によって対象とするモデルの写真を撮影し、順次異なったKの値をもつ一組の格子にかえて同一対象物体の写真を撮影し、それらを互に比較する。したがって、すべての撮影について、同一露出(露出時間：15秒)でシャッターをきり、同一条件の下で各乾板を現像する。(現像温度：20℃、現像時間：5分、定着時間：20分)。またそれらの陽画を同一条件の下で作成する。具体的に示すと、Fig.5のシリーズについては、プリント時間：2・4秒、現像温度：20℃、現像時

Fig. 5 Pitch 0.40mm 2.4sec for the print

Fig. 6 Pitch 0.61mm 1.4sec for the print

間：90秒，定着時間：15分である。Fig. 6のシリーズについては，プリント時間1・4秒で，現像温度，現像時間，定着時間はFig.5のシリーズのものと全く同一である。このようにして得た各写真の下に K の値を付しそれらをFig. 5, Fig. 6に掲載した。また両シリーズとも，被写体とカメラの距離は2・2mである。

4.3 格子照射型についての実験

格子照射型の場合も，間隙率（ここでも間隙率は格子条の配列できまる格子自体の K のことで，格子条の形状による実効的な値や，被写体の位置や，被写体面の勾配等による変化は考えていない）は格子投影型の場合と全く同様に考えられるので，Fig. 7に示す装置（NRCのM. C. VAN WIJK や，M. PAULUN 等によって開発された）に，異なった間隙率 K をもつ格子を配して実験を行った。Fig. 8は格子の配置を示す説明図である。今回の実験には，黒の撚り糸（ナイロン，直径 0.6mm）を用いてA, B, C, D, Eの5種の格子を作成した。この場合，糸の直径はみな0.6mm，したがって異なった間隙率をもたせるためにそのピッチを変えて格子を作成した。つぎに K の値と，それに対応するピッチの値を列挙する。撮影には，レンズ：

Fig. 7 Apparatus of Moirétopography

Fig. 8 Structure of the grid

格子名	A	B	C	D	E
Kの値	3	2	1	0.5	0.3
ピッチ	0.8mm	0.9	1.2	1.8	2.4

NIKKOR 50mm, F1:2を用い、フィルムとしては、TRIX (ASA 400) を用いた。光源部の照明ランプは QUARTZ STUDIO LITE: LAMP TYPE QSL, 1,000 watts, 27,000 lumens, KELVIN 3,200°, LAMP LIFE 75 HRS である。

Fig. 9はマネキンの全体像を撮影したもので、Fig. 10は格子AとBによる写真である。これらの写真のフィルム現像時間は3分、現像温度20°C、定着時間15分。

Fig. 9 F8, 1/60sec

5. 結果についての考察

目的とした間隙率とコントラストの関係について綜

Fig. 10 F5.6, 1/30sec

合的な結論を下すことはまだできないが、今回なし得たことを挙げるとつぎのようになる。

(a) 格子条の配列から発生する格子自体のKを強度伝達関数のなかにとりいれることができ、Kの値が変わると等高線上の強度がKの変化に応じて変わるという理論的根拠を示すことができた。

(b) Fig. 5, Fig. 6の写真から、モアレ縞写真のコントラストは格子自体の間隙率にかなり影響されているという事を実験的に示すことができた。

ここでモアレ縞撮影装置等に関する標準化と言う問題について触れる。近年医学の分野における応用例、すなわち側彎症の一次診断にモアレ縞写真を適用している研究者の発言の一部に「Pattern 分類や、計測に際しては、そこに適切な縞間隔がある。すなわち測定者のミステイクを減少させ、かつ医学的な要求を満たす適当な値の縞間隔が存在する」という言葉である。このような内容を押進めていけば標準化という問題に到達する。そこで精度についても、コントラストについても基準となるようなものが欲しい。また、撮影時における被験者の姿勢のとらせ方にも基準が必要となってくる。

格子を作成する際に決定しなければならないピッチの値と縞間隔について考察する。D. M. MEADOWSによれば

$$\Delta z = \frac{\bar{p}_0 h (N+1)}{d - \bar{p}_0 (N+1)} - \frac{\bar{p}_0 h N}{d - \bar{p}_0 N} \quad \dots (5-1)$$

なる関係がある。ここで $\bar{p}_0$ は格子条のピッチで原文で

は p 、本報告の記号を統一するために $\bar{p}_0$ と書きなおした。

格子投影型の場合も、カメラレンズ、光源レンズの焦点距離を f 、レンズと対象物体間の距離を $\bar{a}$ 、両レンズの光軸間距離を $\bar{D}$ とすれば、それらの間にはつぎの関係があり (Fig. 3 参照)

$$\begin{aligned}\bar{p} &= \frac{\bar{a}}{b} \bar{p}_0 & \dots\dots\dots (5-2) \\ \frac{\bar{a}}{b} &= \frac{\bar{a}-f}{f}\end{aligned}$$

さらに式 (3-2-12) から誘導される

$$z_N = \frac{\bar{a} \bar{p} N}{\bar{D} - \bar{p} N} \quad \dots\dots\dots (5-3)$$

から

$$z_N = \frac{\bar{p}_0 \bar{a} (\bar{a}-f) N}{f \bar{D} - \bar{p}_0 (\bar{a}-f) N} \quad \dots\dots\dots (5-4)$$

が与えられ、縞間隔は Δz_N は

$$\begin{aligned}\Delta z_N &= z_{N+1} - z_N = \frac{\bar{a} (\bar{a}-f) f \bar{D} \bar{p}_0}{\{f \bar{D} - \bar{p}_0 (\bar{a}-f) (N+1)\}} \cdot \\ &\quad \frac{1}{\{f \bar{D} - \bar{p}_0 (\bar{a}-f) N\}} \\ \text{or } &= \frac{(K+1) \bar{a} (\bar{a}-f) f \bar{D} \bar{p}_s}{\{f \bar{D} - (K+1) \bar{p}_s (\bar{a}-f) (N+1)\}} \cdot \\ &\quad \frac{1}{\{f \bar{D} - (K+1) \bar{p}_s (\bar{a}-f) N\}} \\ &\quad \dots\dots\dots (5-5)\end{aligned}$$

となる。

一方、判読しやすい写真を得るということは、モアレ縞写真の場合、特に良いコントラストをもつ写真を得るということになる。そして縞模様のコントラストは格子の間隙率に左右される。(たとえ被写体の位置や曲率、格子条の形状による実効間隙率による影響を考慮したとしても) いま格子自体の間隙率として、或る値 K_0 が最良であるという結論が得られたとする。現実的には我々の取得しうる糸の径に一定の規格があり、任意の値をもつ径が簡単に手にはいるわけではない。

また格子条間の隙間を限りなく小さくすることはできない。すなわちモアレ写真は、幾何光学の分野で扱う現象であって、光の波長のからんだ限界がある。

縞間隔が標準化され、それに対応するピッチ $\bar{p}_0$ (いま他の因子はレンズやレンズ間の距離によって与えられるので、定数のようにみなす) がある値に定められ、

一方格子間隙率の基準としてある値が示されても、格子照射型の場合には $\bar{p}_0$ と K と糸の d' の間に $\bar{p}_0 = (K+1) d'/K$ なる関係があり、格子投影型の場合には $\bar{p}_0 = (K+1) \bar{p}_s$ なる関係があるので格子のピッチを優先すれば、間隙率(すなわちコントラスト)を犠牲にする場合が起き、間隙率を優先すれば $\bar{p}_0$ を犠牲にする(縞間隔を犠牲にする)場合が発生する。すなわち格子の設計にあたっては、このような意味合で K の値は縞間隔に影響し、 $\bar{p}_0$ の値はコントラストに影響する。

最後に、Fig. 9, Fig. 10 の写真から被写体の位置や、その面の曲率が縞模様のコントラストに影響を与えているということがうかがえる。この点に関する詳しい考察と実験は次の報告で行う。

6. あとがき

本研究は、カナダの NRC (National Research Council) に滞在中、行ったものである。NRC の写真測量研究室で過した期間の大半は、X線立体写真から解析的に脊柱の形状を算出し、その結果を図で表現、或は CRT 上に表わす為のシステム開発に費やした。すなわち脊柱の形状とモアレ縞写真の間に存在する相関性について論議している際に、モアレ写真技術に関する標準化の問題が出てきた。従来の経験から、格子自体のもつ間隙率がモアレ縞写真のコントラストにどのような形で関係しているのであろうかと考えていたので、また NRC で開発された非常に使いやすい撮影装置 (Fig. 7) や、立体写真用カメラ (Fig. 4) があったので、今回の実験と考察に手をつけた。従って実験の数はまだ不十分であるが、凡その傾向と理論的な扱いの基礎はできたと考えその一部を先ず報告する。

おわりに、色々な面で御世話になった写真測量研究室の Head Researcher Dr. T. J. BLACHUT、及び研究スタッフの方々に厚く御礼申しあげる。

(1979.2.2 受付)

参 考 文 献

1. D. M. MEADOWS, W. O. JOHNSON, J. B. ALLEN. Appl. Opt. 9, 942 (1970)
2. H. TAKASHAKI. Appl. Opt. 9, 1467 (1970)
3. B. DRERUP. Eine Apparatur zur Dokumentation von Erkrankungen des Haltungs- und Bewegungsapparates durch Moiré Topografie. Juli, (1977)