

Medição de formas livres 3D usando a técnica de Shadow Moiré

Rodrigo Franco Corrêa da Costa
rodrigofcc@bol.com.br / 31 32873409

Elaine Maria Ribeiro
elainemribeiro@hotmail.com / 31 99274741

Meinhard Sesselmann, Dr.
meinhard@ufmg.br / 31 34995058

RESUMO

O objetivo deste trabalho é medir superfícies 3D usando o método de Shadow Moiré. Para a quantificação das franjas de Moiré foi usada a técnica de deslocamento de fase.

O objeto estudado foi um molde gessado de um pé. Foram adquiridas 4 fotos do objeto em 4 posições. Um software dedicado foi utilizado para o processamento das imagens e o cálculo do perfil do objeto com as informações de profundidade de cada região. Neste trabalho apresenta-se uma análise de erro do sistema de medição.

Os resultados obtidos demonstram que incertezas na ordem de $< 0,1$ mm podem ser facilmente atingidas. Conclui-se que a técnica pode ser usada para a medição de formas livres 3D, visto que é um método sem contato com baixo índice de incerteza, porém, pequenas melhorias podem ser feitas em projetos futuros visando baixar ainda mais a incerteza do experimento.

PALAVRAS CHAVE : *Moiré, Shadow Moiré, Medição 3D, Phase-Shifting*

1) INTRODUÇÃO

Hebert et al (2003), mostra que o arco medial plantar é uma região extremamente importante no estudo da postura e do equilíbrio muscular dinâmico e estático do ser humano, sendo a sua disfunção, diversas vezes apontada como a causa ou consequência de diversas patologias, quadros dolorosos e distúrbios funcionais. Andrews et al (2000), mostra que diversos métodos são utilizados para avaliar e estudar esta área, destacando-se entre eles a avaliação clínica, onde obtém-se ou estuda-se a impressão plantar do paciente, podogramas e exames como a radiografia e ultra-sonografia. Novas técnicas estão sendo testadas atualmente, no intuito de se conseguir um método mais simples, objetivo e confiável, para se medir a altura real do arco medial do pé.

O objetivo deste trabalho é demonstrar a aplicabilidade de uma técnica cada vez mais usada na área de engenharia, chamada Shadow Moiré, associado ao deslocamento de fase (phase shifting) para a medição do perfil do arco medial. Visando um melhor entendimento desta técnica, e de seus componentes, foi realizada uma análise de erros do sistema.

2) MENSURANDO

Kendall et al (1995), mostra que a função dos arcos plantares é tornar o pé flexível ou rígido conforme necessidade. A disposição dos ossos do pé dá uma forma de semi-cúpula para a região plantar e esta por sua vez é constituída por três arcos: dois longitudinais e um transversal. Gardner et al (1974), mostra que o arco longitudinal interno ou arco medial do pé é o mais alto e se estende do calcâneo até a cabeça do primeiro metatarsiano. Este arco é denominado arco de movimento, pois durante a marcha dá maior elasticidade, permitindo que o mesmo seja lançado para frente.

Acredita-se que a peça principal da manutenção permanente do arco plantar é a sola aponeurótica e o considerável sistema ligamentar dessa região, sendo este sistema muito potente, cuja peça principal é o grande ligamento calcâneo cubóide plantar.

3) ESTADO DA ARTE

Diversos métodos são atualmente utilizados para a avaliação dos arcos plantares. Nas avaliações desta estrutura, diversas características devem ser observadas, além da medida do arco propriamente dita, visto que o objetivo é diagnosticar, entre outros, qual o tipo de pé que o paciente apresenta.

Na técnica da impressão plantar o pé avaliado é pintado com giz, sendo então impresso um carimbo da sola do pé em um papel com descarga de peso. A altura do arco é dividida pela altura do calcanhar detendo-se assim um índice – o índice do arco plantar. Um exame utilizado para verificar o arco, porém mais específico para se enxergar as descargas de peso, é o podograma obtido pela plataforma de Harris.

Na avaliação por RX, e outras formas de imagem, a medida mais freqüentemente utilizada, é a do ângulo Talometatarso lateral. Hanra et al (1994), conclui que a margem de incerteza é relativamente alta para todos os processos. Para tornar os diagnósticos no arco plantar mais rápidos e seguros, necessita-se de uma técnica simples e adequada, de preferência sem contato, para a quantificação do seu perfil. Uma vez de posse do perfil, índices usados freqüentemente do arco plantar podem ser derivados seguramente.

4) TEORIA

4.1) Breve Histórico

Takasaki (1970), foi o primeiro pesquisador a utilizar o método Moiré para a análise de superfície de corpos vivos. Foram Gold & col. os primeiros a analisar a superfície plantar, porém sem um bom controle sobre as margens de erro do experimento. Recentemente foi realizado um estudo por Volpon (1994), que apresentou uma melhor avaliação quantitativa do método. Porém, como em diversos outros trabalhos usando Moiré, não foi feita nenhuma análise de erros, o que diminui a confiabilidade dos resultados apresentados.

4.2) Fenômeno Físico

O método de Moiré, já vem sendo usado há muito tempo em diversas áreas para a análise de superfície de objetos. Quando um objeto é iluminado por uma grade, ocorre um fenômeno óptico, onde franjas de Moiré são geradas na sua superfície. Cada franja corresponde a uma profundidade na superfície do objeto. Portanto, quando fotografadas por uma câmera, as franjas de Moiré formam um campo que guarda a informação tridimensional do objeto. Essas grades podem ser físicas, produzidas em transparência ou filme fotográfico, ou podem ser geradas por interferência de duas ondas de luz projetadas sobre a superfície. É o batimento entre as linhas de duas grades parecidas ou uma grade e sua sombra que dá origem às chamadas “franjas de Moiré”.

As técnicas de moiré são amplamente utilizadas para medição de formas. Um dos métodos mais simples e de maior precisão é o chamado “Shadow Moiré” ou Moiré de Sombra. As franjas de Moiré são ambíguas, ou seja, quando fotografadas apenas uma única vez, perde-se a informação sobre o sentido do perfil. Uma maneira de resolver esse problema é combinar Shadow Moiré com a técnica de deslocamento de fase. Poste et al (1989), demonstrou a aplicabilidade dessa combinação afastando a grade do objeto, ou vice versa. À medida que se desloca a grade, as projeções das franjas, se “movem” na peça. Considera-se um deslocamento de 360° o exato momento em que uma franja toma o lugar da sua franja vizinha na peça.

4.3) Algoritmo para Deslocamento de Fase

Vários trabalhos (Chiang, 1978 e Volpon, 1994), descrevem o método de Shadow Moiré combinado com a técnica de deslocamento de fase. Neste trabalho foi adotado o algoritmo de 4 passos, pois dá origem a uma solução simples e robusta contra erros no passo de fase. As intensidades I de cada das quatro fotografias, mutuamente deslocados entre si, podem ser descritas como:

$$I(0^\circ) = I_o[1 + \cos(\phi)]$$

$$I(90^\circ) = I_o[1 - \sin(\phi)]$$

$$I(180^\circ) = I_o[1 - \cos(\phi)]$$

$$I(270^\circ) = I_o[1 + \sin(\phi)]$$

Observa-se que I são as intensidades de cada pixel no plano do CCD da câmera e são funções de x, y . I_o representa a intensidade média (ou de fundo) de cada fotografia. Uma possível combinação destas equações resulta em:

$$\phi = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (1)$$

A partir do valor de Φ podemos calcular a profundidade z , utilizando a seguinte equação:

$$z = \frac{n \cdot p}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (2)$$

onde z é a distância entre vidro e objeto, n é a ordem de franja ($\phi/2\pi$), p é a soma da largura de uma franja e do espaço entre duas franjas, $\tan \alpha$ é o tangente do ângulo formado entre câmera e objeto e $\tan \beta$ é o tangente do ângulo formado entre projetor de luz e objeto.

5) MATERIAIS E MÉTODOS

Foi construído um molde de gesso do pé direito de um indivíduo que não apresentava qualquer anomalia em relação à região estudada. Inicialmente foi feito um molde negativo do pé, através do uso de material plástico (Jeltrade®), utilizado na confecção de moldes dentários. Posteriormente, o molde positivo do pé foi extraído do molde negativo com o uso de gesso de granulação fina. A Figura (1) mostra o suporte de madeira com o molde de gesso de forma a deixá-lo em posição vertical com sua parte mais baixa a uma altura de 9,0 cm de altura, sendo a fixação do mesmo feita por 2 parafusos atrás do molde.



Figura 1: Molde gessado e grade de franjas

Na mesma Figura (1) mostra-se a grade utilizada no experimento. Uma tela com franjas de 0,4 mm de espessura e 0,4 mm de espaçamento entre elas foi configurada utilizando-se linhas impressas em uma transparência para computador com resolução de 720 x 720 dpi. A transparência foi devidamente presa em uma placa de vidro transparente (22,0 cm de altura por 43,0 cm de comprimento), evitando-se aprisionamento de ar entre placa e transparência. Esta placa de vidro foi encaixada a um suporte de madeira previamente construído de forma a deixar a mesma em posição vertical, e a uma altura de 7,0 cm. Foi utilizada uma câmera fotográfica digital (Fig. 2) Sony Cyber-shot DSC P-72, com sensor RGB-CCD 1/2 pol., 3,207 Megapixels, distância focal equivalente a 39 - 117mm, e obturador igual a 2 - 1/1.000 s.



Figura 2: Câmera fotográfica e projetor de luz

Para projeção de luz, foi utilizado um projetor de slides (Fig. 2) Belga, da marca Sawyer's, modelo Sawyer's 1500 com lâmpada de 250 W.

5.1) O Sistema de Medição

A aquisição das imagens das projeções de franjas depende de um sistema cuidadosamente alinhado. A Figura 3 mostra o arranjo dos diversos componentes do sistema usado no experimento. A grade foi colocada sobre uma guia com resolução de posicionamento de 0,002 mm, estando esta livre para aproximar ou afastar a grade do objeto analisado.

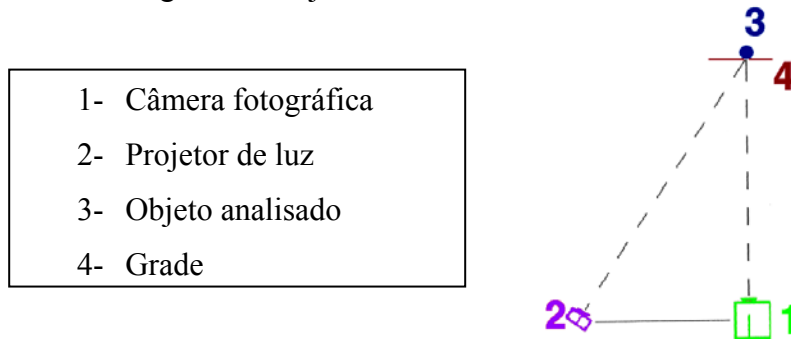


Figura 3: Posicionamento do sistema

5.2) Calibração do Sistema

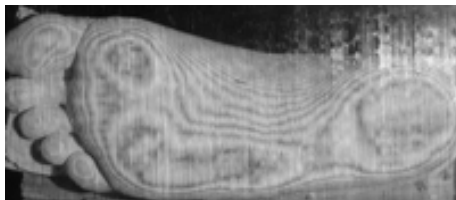
Para se adquirir as imagens, é necessário que primeiro se calibre o sistema no intuito de se descobrir o deslocamento de fase para o sistema construído. A calibração foi efetuada com os seguintes parâmetros:

$p = (0,8 \pm 0,01)\text{mm}$	(Distância entre franjas da grade)
$A = (875 \pm 5)\text{mm}$	(Distância entre câmera e grade)
$B = (460 \pm 5)\text{mm}$	(Distância entre câmera e projetor)
$D = (0 \pm 5)\text{mm}$	(Distância entre câmera e ponto de observação normal)

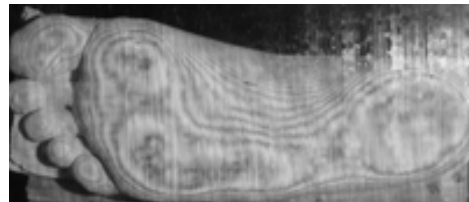
Com os dados acima entrando na Eq. (2), obtêm-se 1,7mm para cada deslocamento de 360° , o que resulta em $1,52 \text{ mm} / 4 = 0,38 \text{ mm}$ de avanço da grade para cada passo de fase .

5.3) Aquisição das Imagens

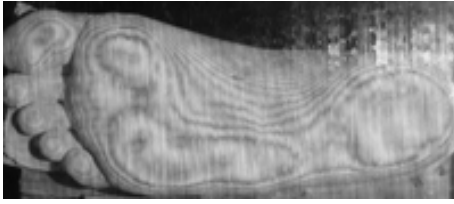
Após a calibração, todos os constituintes do sistema não puderam mais ser movimentados (com exceção da grade que foi movimentada de forma calculada para a aquisição das imagens). Foram retiradas quatro fotografias com resolução máxima da câmera sem o uso de flash, ilustradas na Fig. (4).



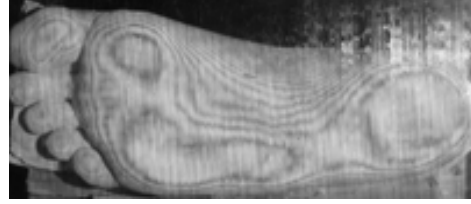
a) Sem deslocamento de fase



b) Deslocamento de 90°



c) Deslocamento de 180°

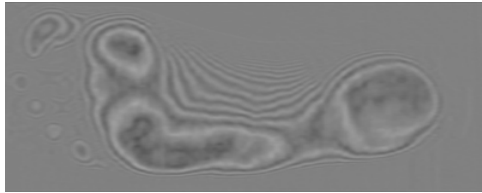


d) Deslocamento de 270°

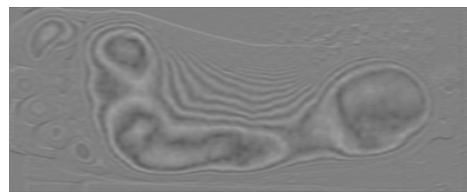
Figura 4: Imagens deslocadas adquiridas do objeto

5.4) Aplicação da Equação para Deslocamento de Fase e Filtragem

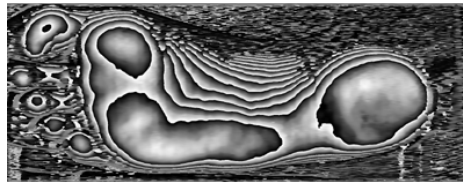
Estando de posse das imagens, o próximo passo foi aplicar a Eq. (1) resultando no mapa de fase ilustrado na Fig. (5). Foi criado um programa executável, onde foram subtraídas as fotos $I_4 - I_2$. A imagem resultante desta subtração foi filtrada por um filtro do tipo passa baixo com o objetivo de diminuir ruídos na imagem e, principalmente, remover as franjas primárias verticais de alta frequência espacial, que são causadas pela grade. A Fig. (5a) mostra o resultado deste processo. A imagem corresponde à componente senoidal de ϕ , ou seja apenas a componente senoidal das franjas secundárias (franjas de Moiré) que contém a informação do perfil. O mesmo foi feito com $I_1 - I_3$, obtendo-se a imagem correspondente à componente co-senoidal de ϕ , mostrado na Fig. (5b), ou seja apenas a componente co-senoidal das franjas secundárias que contém a informação do perfil. Com a razão dessas duas imagens resultantes, obtém-se o mapa de fase filtrado, mostrado na Fig. (5c).



a) Imagem senoidal de $\phi = (I_4 - I_2)$



b) Imagem co-senoidal de $\phi = (I_1 - I_3)$



c) Imagem senoidal de ϕ após filtro

Figura 5: Imagem do mapa de fase $\phi = (I_4 - I_2) \div (I_1 - I_3)$

Pode-se notar que as imagens passam da cor branca para a cor preta, porém agora atravessando diversas tonalidades de cinza, onde a parte mais clara representa a região mais alta do perfil, e a parte mais escura representa a região mais baixa, em cada ordem de franja respectivamente.

5.5) Salto de Fase

Russ (1994), mostra que a função $\arctan\left(\frac{\sin \Phi}{\cos \Phi}\right)$ resolve para o argumento apenas num intervalo de $-\pi \leq \Phi \leq \pi$, já considerados os sinais do numerador e denominador. Ou seja, a cada 2π (correspondente a $z \approx 1,52$ mm no perfil) são introduzidos descontinuidades, chamadas também de

saltos de fase. Esses saltos de fase podem ser observados no mapa de fase mostrado na Fig. (5c). Neste mapa de fase, os valores de Φ , obtidos num intervalo de $0 \dots 2\pi$ pelo algoritmo, foram transformados linearmente em 256 níveis de cinza de preto a branco. Quando um ciclo de fase se completa, ou seja, a cada múltiplo inteiro de 2π , um salto de fase aparece na imagem. Desta forma, uma transição abrupta de branco para preto representa um aumento de fase (correspondente a um aumento no perfil), enquanto uma transição de preto para branco representa uma diminuição. Portanto, o próximo passo do processo de medição foi a remoção do “salto de fase”. Neste processo procura-se a ordem de franja para cada ponto no mapa de fase.

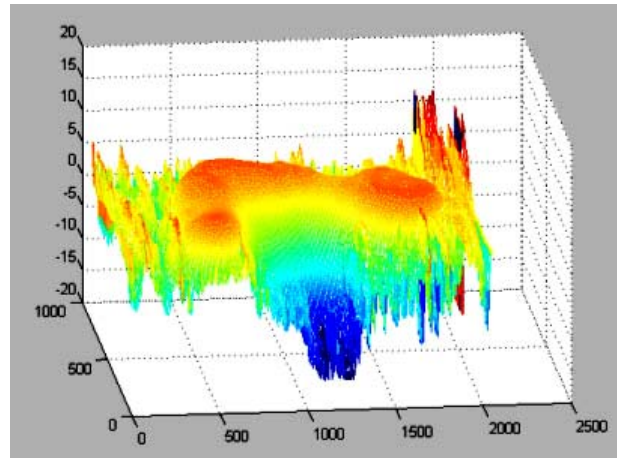
5.6) Perfil 3D

Após a remoção dos saltos de fase, entra-se na Eq. (2) com o valor da ordem de franja para cada ponto na imagem a fim de quantificar o perfil em milímetros. Este perfil pode ser apresentado tanto na forma 2D (Fig. 6a) quanto na forma 3D (Fig. 6b).

A Figura (6b) apresenta mais de 3 mega pixels, exibindo a posição de cada ponto nos eixos X e Y, sendo que os mesmos possuem uma profundidade Z específica para cada um, representados na figura, por cores diferentes dependendo da profundidade do ponto.



a) Imagem do perfil z em 2D



b) Imagem do perfil Z em 3D
(escala [z] = mm, [x,y] = pixels)

Figura 6: Imagem do perfil z

5.7) Análise de Incerteza

Após a aquisição dos valores do sistema foi feita uma análise para cálculo da incerteza combinada do mesmo, considerando a incerteza para uma ordem de franja. Primeiramente foram feitas as derivadas parciais de z em relação a cada grandeza independente: (A), (B), (D), (p) e (ϕ).

Gonçalves (2002), mostra que através de uma expansão em série de Taylor para grandezas de entrada estatisticamente independentes, foi calculada a incerteza padrão combinada:

$$U^2(z) = \left(\left| \frac{\partial z}{\partial \phi} \right| U(\phi) \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial z}{\partial p} \right| U(p) \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial z}{\partial A} \right| U(A) \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial z}{\partial B} \right| U(B) \right)^2 + \left(\left| \frac{\partial z}{\partial D} \right| U(D) \right)^2 \quad (3)$$

Foram combinadas incertezas expandidas, sabendo que todas as incertezas têm o mesmo nível de abrangência = 95% e mesmo grau de liberdade = ∞ . O desenvolvimento do cálculo, assim como a análise dos resultados, encontra-se no capítulo seguinte.

6) ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na imagem do mapa de fase percebe-se que, nas regiões mais profundas, a parte do arco medial plantar não está nítido, o que atrapalha a medição da região. Futuros experimentos deverão ser feitos no intuito de encontrar o melhor tipo de filtro para que não se percam informações neste processo. Abaixo, desenvolvemos o cálculo para a análise da incerteza combinada do sistema de medição.

$$z = \frac{\phi \cdot p}{2\pi(\tan \alpha + \tan \beta)} = \frac{\phi \cdot p}{2\pi\left(\frac{B}{A} + \frac{D}{A}\right)} \quad \text{com os dados experimentais mencionados no item 5.2.}$$

$$\frac{\partial z}{\partial \phi} = \frac{p \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot B} = \frac{0,8.875}{2 \cdot \pi \cdot 460} = 0,242 \text{ mm/rad}$$

$$\frac{\partial z}{\partial p} = \frac{\phi \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot B} = \frac{\phi \cdot 875}{2 \cdot \pi \cdot 460} = 0,303 \cdot \phi = 0,303 \cdot 6,28 = 1,91 \text{ mm}$$

$$\frac{\partial z}{\partial A} = \frac{\phi \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot B} = \frac{\phi \cdot 0,8}{2 \cdot \pi \cdot 460} = 2,77 \times 10^{-4} \phi = 1,74 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\frac{\partial z}{\partial B} = -\frac{\phi \cdot p \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot B^2} = -\frac{\phi \cdot 0,8.875}{2 \cdot \pi \cdot 460^2} = -5,27 \times 10^{-4} \phi = -3,31 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\frac{\partial z}{\partial D} = -\frac{\phi \cdot p \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot B^2} = -\frac{\phi \cdot 0,8.875}{2 \cdot \pi \cdot 460^2} = -5,27 \times 10^{-4} \phi = -3,31 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$U(z) = \sqrt{U^2(z)} = 0,091 \text{ mm}$$

O valor obtido ao final do cálculo para a incerteza combinada foi de $\pm 0,091 \text{ mm}$, para uma ordem de franja, considerando-se uma incerteza do algoritmo de determinação do ângulo de fase $U(\phi) = 2\pi \text{ rad} / 20$.

7) DISCUSSÃO

Os valores introduzidos para o cálculo das incertezas no capítulo anterior foram conseguidos através de medições repetidas, bom senso e estudos a priori para as demais variáveis do sistema. Observa-se a grande diferença entre as demais incertezas relativas, onde a incerteza de medir a fase, $U(\phi)$ se destaca como o maior contribuinte para a incerteza total do perfil z .

O diagrama da Fig. (7) mostra claramente que a incerteza combinada está fortemente afetada pela incerteza de fase $U(\phi)$, em função desta ter incerteza relativa superior às demais grandezas. Uma melhora no resultado da medição só será alcançada buscando-se reduzir a incerteza de medição da fase ϕ $U(\phi)$ até níveis em que haja uma equiparação com a incerteza de medição relativa associada às outras grandezas.

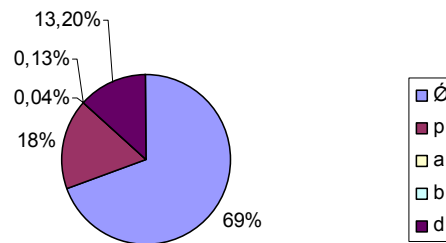


Figura 7: Diagrama em porcentagem das incertezas relativas

8) CONCLUSÕES

Concluiu-se que o método de Shadow Moiré combinado com Deslocamento de Fase pode ser usado para a medição do arco medial plantar. As incertezas encontradas da ordem de 0,1 mm são mais do que satisfatórias para aplicações na área de engenharia médica. Porém algumas melhorias podem ser feitas na aquisição e o processamento de imagens. Os esforços deveriam-se concentrar, principalmente, no cálculo da fase ϕ , já que sua incerteza é o principal contribuinte para incerteza total do sistema. Uma maneira de atingir tais objetivos será a utilização de filtros de imagens mais adequados. Sugere-se, também, a aplicação de outros algoritmos para deslocamento de fase e a aplicações da técnica estudada em partes do corpo humano diferentes da vista neste trabalho.

9) REFERÊNCIAS

- Andrews J.R.; Harrelson, G.L., 2000, **“Reabilitação física das lesões desportivas”** Ed. Koogan, Rio de Janeiro, 2ª edição, pp.323-336.
- Chiang, F.P., Kim, R.C., 1978, **“3D Vision System Analysis and Design”** in Tree-Dimensional Machine Vision, 153p.
- Fantin, V. A., 1999, **“Medição de formas livres tridimensionais por topogrametria”**. Dissertação de mestrado, UFSC, Florianópolis..
- Gardner, W. D.; M.D., Osburn, W.A., 1974, **“Anatomia humana”**. São Paulo- SP: Editora Atheneu.
- Gonçalves Jr.A.A., 2002, **“Metrologia”** Parte 1, Cap. 9, UFSC, Florianópolis.
- Hanra, A & Volpon, J., 1994, **“Fotopodometria moiré quantitativa na avaliação do arco plantar longitudinal medial”**, USP, Ribeirão Preto.
- Hebert, H & Xavier, R., 2003, **“Ortopedia e Traumatologia”**. Ed. Artmed, São Paulo, 3ª edição, pp.662-671.
- Kendall, F.P., McCreary, E.K., Provance, P.G., 1995, **“Músculos – provas e funções”**, 4ª Ed., pp.211-213.
- Post, D; Han B & Ifju P., 1989, **“High sensitivity moiré”**. **Experimental analysis for Mechanics and Materials**. Mechanical engineering series, ed. Spring-Verlag, Austin, Texas, pp.322-365.
- Russ, J. C., 1994, **“The image Processing Handbook”** CRC Press Inc, Flórida, 2ª edition, pp.112-123.
- Takasaki, H. 1970, **“Moiré Topography”**, Applied Optics, Vol. 9, pp.1967-1472.

3D Form Measurement using Shadow Moiré

Rodrigo Franco Corrêa da Costa

rodrigofcc@bol.com.br / 31 32873409

Elaine Maria Ribeiro

elainemribeiro@hotmail.com / 31 99274741

Meinhard Sesselmann, Dr.

meinhard@ufmg.br / 31 34995058

The purpose of this paper is to perform measurements of surface profiles using Shadow Moiré. In order to quantify these profiles the technique was combined with phase-shifting.

The object studied here was a plaster-cast of a foot. Four images were acquired in four different positions. A dedicated software was developed in order to process the images and to calculate the foot's profile. In addition to that, the paper presents a brief metrological analysis in order to estimate the measurement uncertainty of the system.

Results obtained with this system demonstrate that combined uncertainties lower than 0,1 mm are feasible. The principal advantage of this technique is the absence of contact which makes it a good choice in many 3D form measurements. However, minor improvements could be introduced in future projects in order to further lower its uncertainty.

Key words: *Moiré, Shadow Moiré, 3D form measurement, Phase-Shifting*