

FRUIT VOLUMETRIC DETERMINATION BASED ON MOIRÉ TECHNIQUES

RECONSTITUIÇÃO TOPOGRAFICA E VOLUMÉTRICA DE FRUTOS
UTILIZANDO TÉCNICAS ÓPTICAS DE MOIRÉPh.D. Stud. Eng. Marcos V. G. Silva¹⁾, Ph.D. Eng. Celina de Almeida,
Ph.D. Eng. Antonio Carlos Loureiro Lino²⁾, Prof. Ph.D. Eng. Inácio M. D. Fabbro¹⁾¹⁾Faculty of Agricultural Engineering, UNICAMP, Campinas, SP / Brazil ²⁾IAC, Jundiaí, SP / Brazil

Tel: +55 19 3521-1059; E-mail: inacio@feagri.unicamp.br

Abstract: Three-dimensional survey of irregular, as well as regular solids has recently received significant attention from the scientific community due to its wide range of applications, including topics in agricultural engineering as plant-machine mechanical relationship. The pertinent literature discloses several methods and techniques to carry out three-dimensional measurements associated to a wide variety of cases. Moiré techniques are included in a group of non-contact and non-destructive methods based on the Moiré phenomena which generate optical fringes onto the tested body surface. Moiré methods require simple and low cost experimental setup, yielding accurate results when compared to other measuring systems. This work was focused on the projection Moiré technique with phase shift, employing two types of optical grids named Ronchi and a sinusoidal one. Metrological errors of tested techniques as compared with the Moiré method have been determined as well. This work demonstrated the best performance of grid frequency variation through several experiments applied to irregular solids shape determination as fruits. Body volumes were compared with conventional techniques as water immersion; meanwhile linear measures were compared with reading caliper results. The application of free software such as ImageJ, RisingSun Moire, Scilab / SIP and routines was considered very useful to reach the final results.

Keywords: optical three - dimensional surveys, Moiré with phase shift techniques, volume determination and solid three-dimensional reconstruction

INTRODUCTION

The Moiré optical techniques are of very broad application in agricultural fields, especially in agricultural engineering, as well as in the overall engineering fields. These applications include micro relief survey of the soil for tillage quality control, of fruit and vegetables, plant-machine mechanical relations, and mechanical behavior of vegetative materials. It worth emphasize the application of Moiré methods as photo-elastic technique, similarly as the classic photo-elasticity, as hologram, as speckle and others. The opportunity of generating scientific knowledge associated to the Moiré methods applied to agricultural engineering subjects has motivated this research work, attempting to the possibilities of generating Digital Elevation Models (DEM) of regular as well as irregular surfaces, generating the volume and the three-dimensional views of the body under study [5].

This research work emphasizes the optical grid frequency influence on the resulting DEM, discussing on the advantages and disadvantages of each tested grid frequency.

Phase shifting Moiré technique is considered a quite simple method, needing not moving equipment and being of low cost [10]. It also exhibits high precision and adaptable to objects of different sizes by just varying the

Resumo: A medição de sólidos tridimensionais tem recebido uma grande atenção da comunidade científica, devido à sua ampla gama de aplicações. Porém existem diversos métodos e técnicas para se obter tais medições, este trabalho demonstra a técnica de moiré que é uma técnica sem contato e não destrutiva, com um rápido processo de digitalização cujos fenômenos de Franjas de Moiré são o resultado da subtração da projeção de grades sobre um certo objeto com relação as grades projetadas em um plano referencial. Possui medição precisa comparável com a de outros sistemas. Demonstra também a exatidão das técnicas de moiré, sendo dado maior enfoque na técnica de moiré de projeção com deslocamento de fase, e pela utilização de dois tipos de grades a de Ronchi e senoidal, onde são observados os possíveis erros. Neste trabalho foi comprovado o melhor desempenho dos tipos e variação da frequência de grades incluindo vários exemplos práticos da sua aplicação em sólidos irregulares (frutos), determinação volumétrica de sólidos irregulares. Emprego de "softwares" gratuitos o qual também foi uma preocupação para disseminação da técnica, tais como ImageJ, RisingSun Moiré, SCILAB/SIP e rotinas.

Palavras-chave: técnicas perfilométricas ópticas, técnicas de moiré com deslocamento de fase, determinação de volume em sólidos e reconstrução tridimensional de sólidos

INTRODUÇÃO

A utilização das técnicas de moiré é de grande importância para diversos segmentos, como na Engenharia Agrícola, envolvendo vários problemas associados ao estudo da topografia de superfícies, o comportamento mecânico de materiais biológicos, controle da qualidade na operação de preparo do solo baseado na determinação do micro relevo, relações mecânicas máquina-planta, etc. Em função da oportunidade de gerar conhecimento da aplicabilidade das técnicas de moiré em atividades ligadas a Engenharia Agrícola, motivou-se o desenvolvimento desta pesquisa, demonstrando assim, que a técnica de moiré pode ser aplicada com resultados satisfatórios na geração de Modelos Digitais de Elevação de superfícies regulares e irregulares, gerando a reconstrução de sólidos ou superfícies em três dimensões [5], juntamente, com a obtenção de medição volumétrica.

A pesquisa aborda as variações nos tipos e frequências das grades, demonstrando comparações nos resultados obtidos, bem como as vantagens e desvantagens de cada uma, comprovando que a sensibilidade depende principalmente do período do retículo da grade.

Em pesquisas anteriores não foi constatada nenhuma evidência de que o tipo de grade influenciava na reconstrução tridimensional e na medição volumétrica. A Técnica de moiré com Deslocamento de Fase (Phase shifting) é uma técnica muito simples, não possui peças móveis e é de baixo custo [10]. Além disso, tem alta

grid period [1]. A variation of that method was developed, by projecting onto the body surface a sinusoidal grid pattern with codified RGB colors, obtaining, that way, the DEM by phase shifting, requiring not more of one image.

The results can be influenced by color of the object being tested, indicating that the method is recommended for bodies of neutral colors [1, 14, 15]. [3] reports the application of the RisingSun Moiré program to calculate the phases, generating the wrapped phase image, as well as to obtain the unwrapped image to generate the DEM of a pear fruit model. [8] and [9] developed algorithms for the MATLAB program to calculate the phases and the unwrapping procedures, eliminating the steps by adding or subtracting π values and by comparing a pixel with its neighboring one the differences with that value, positive or negative, respectively are found.

[11] described the Phase Shifting Method applied to Shadow Moiré, emphasizing the need of 04 images of Moiré fringes. At each image, the object is approximated or distanced from the reference grid (Rg), displacing the Moiré fringes by $1/2\pi$, 1π and $3/2\pi$ of phase. However, when 04 images are employed and displaced by $\pi/2$, the light intensity at each one of these images is described by the following equation.

$$I_1(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos \phi(x, y) \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi/2 + \phi(x, y)] \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[\pi + \phi(x, y)] \quad (3)$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) - b(x, y) \cos[3\pi/2 + \phi(x, y)] \quad (4)$$

Where $a(x, y)$ stands for light intensity of the background at each image point, $b(x, y)$ stands for modulation intensity at image point and ϕ stands for the phase to be determined. [13] demonstrated that phase term, $\cos \phi$, for each point of the image comes from the simultaneous solution of these 4 equations

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_4(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_3(x, y))} \right] \quad (5)$$

For each 3 images displaced by $\pi/3$, the phase term can be obtained through the Equation 6.

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_3(x, y)) - (I_2(x, y))}{(I_1(x, y)) - (I_2(x, y))} \right] \quad (6)$$

For the 5 images displaced by $\pi/5$ the phase term can be obtained through the Equation 7.

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{2(I_2(x, y)) - (I_4(x, y))}{2(I_3(x, y)) - (I_5(x, y)) - (I_5(x, y))} \right] \quad (7)$$

[2, 8, 9, 11] reported the application of phase shift method to the shadow Moiré with 4 images At each image, the object is approximated or distanced from the reference grid (Rg), displacing the Moiré fringes by $1/2\pi$, 1π and $3/2\pi$ of phase.

precisão e facilidade de adaptação a objetos de vários tamanhos e texturas apenas variando o período das franjas projetadas [1]. Para melhorar e contornar este problema, foi desenvolvida uma variação desta técnica em que se projeta padrão de grades senoidais com cores codificadas no espectro RGB, de modo que, com apenas uma imagem, e aplicando a técnica de deslocamento de fase obtive-se o MDT dos objetos.

Porém os resultados podem ser influenciados pela coloração do objeto, sendo, portanto indicada apenas para objetos com coloração neutra [1, 14, 15]. [3], utilizou um programa computacional específico (RisingSun Moiré) para fazer o cálculo das fases, gerando o mapa de fases empacotadas, e também para o desempacotamento de fases gerando o MDT de uma modelo de pera feito de cera [8] e [9], desenvolveram algoritmos para programa MATLAB, com a finalidade de fazer o cálculo das fases e o desempacotamento isto é, elimina os degraus, pela soma ou subtração de valores de π , e comparando um "pixel" com o seu vizinho encontra-se diferenças com esse valor, negativos ou positivos respectivamente.

[11], descrevendo o Método de Mudança de Fase aplicado à técnica de *moiré* de Sombra informa que são necessárias 4 imagens das franjas de *moiré*. Em cada uma delas as o objeto é aproximado ou afastado do Retículo de referencia (Rr) de maneira a produzir deslocamentos das franjas de *moiré* $1/2\pi$, 1π e $3/2\pi$ de fase. Quando se usa 4 imagens deslocadas de $\pi/2$, a intensidade luminosa em cada uma das imagens é descrita pelas equações:

Onde $a(x, y)$ é a intensidade luminosa do fundo em cada ponto da imagem, $b(x, y)$ é a intensidade de modulação em cada ponto da imagem, ϕ é a fase a ser determinada. [13], demonstra que resolvendo as 4 equações simultaneamente, pode se obter o termo fase ($\cos \phi$) para cada ponto da imagem:

Para 3 imagens deslocadas de $\pi/3$, o termo fase pode ser obtido pela equação 6.

E Para 5 imagens deslocadas de $\pi/5$, o termo fase pode ser obtido pela equação 7.

[2, 8, 9, 11] aplicando o método de deslocamento de fase à técnica de *moiré* de sombra utilizaram 4 imagens das franjas de *moiré*. Em cada uma delas o objeto é aproximado ou afastado do retículo de referencia (Rr) de maneira a produzir gerar das franjas de *moiré* deslocadas $1/2\pi$, 1π e $3/2\pi$ de fase.

[13] emphasizes some advantages of these techniques when compared to the techniques supported by this one: high precision, quickness, good results even with low contrast.

MATERIAL AND METHODS

Volume measurement through the Moiré technique included a PC, a LCD projector, a CCD camera coupled to a Data Translation model DT313 data capturing board and the Global Lab Image2 of the Data Translation for image capturing. Six rubber cylinders and resin made fruit models for volume tests. Two types of grids, Ronchi and sinusoidal with 100 and 200 lines per millimeter, projected a distance of 1 meter. Four images were captured displaced of 90° . Four images of Moiré fringes were captured, referred as I1, I2, I3 and I4, displacing the grid in the Z direction from the reference grid which generated displacement from the fringes of 0 , $1/4\pi$, $1/2\pi$ and $3/4\pi$. From these images, the "RISING-SUN MOIRÉ" software generated the wrapped phase. The phase unwrapping produced the digital model of the fruit. The obtained image is qualified as a "raster" which color varies from zero to 255, i.e. 256 color levels corresponding to Z values. The measure by immersion is based on the volume of liquid displaced by the testing body as shown on Figure 1. Two types of optical grids were applied, the sinusoidal grid and the Ronchi grid.

[13] cita algumas vantagens dessas técnicas, quando comparadas às técnicas às quais essas auxiliam, as quais são: alta precisão, rapidez e bons resultados mesmo com baixo contraste das franjas.

MATERIAL E MÉTODOS

O arranjo experimental foi constituído por um computador com processador Core 2 Duo, de 2,2GHz, com 1GB de memória RAM, ao qual foi acoplado um projetor LCD e uma câmera CCD. Sendo o projetor da marca NEC, modelo VT560, com resolução de 1024 colunas por 768 linhas. A câmera CCD, marca SAMSUNG, modelo SDC-312, em cores, com resolução de 640 colunas por 480 linhas, acoplada a uma placa de captura de imagens marca Data Translation, modelo DT313. Para a captura e tratamento das imagens utilizou-se o software Global Lab Image2 da Data Translation. Foram feitas projeções de dois tipos de grades: a senoidal e Ronchi, com duas variações de frequências cada, sendo-as de 100 linhas por mm e 200 linhas por mm. Foram obtidas quatro imagens das franjas de *moiré* (I1, I2, I3 e I4). Entre elas, a grade é deslocada na direção Z (afastada do retículo de referência) distâncias que produzam deslocamentos das franjas de *moiré* de 0 , $1/4\pi$, $1/2\pi$ e $3/4\pi$. O modelo final é uma imagem do tipo "raster" onde as cores variando de 0 a 255, isto é, 256 níveis de cores ou tons de cinza, correspondem às cotas ou aos valores de z.

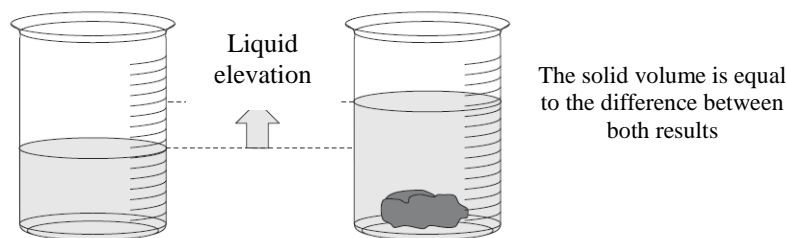


Fig. 1 – Volume Determination Method by Fluid Displacement

RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 2, (a), (b), and (c) shows the projected grid onto a the surface of an apple fruit model, the topographic view expressed in gray scale and digital elevation model, respectively. Table 01 shows the volume values as generated by the immersion technique. Table 02 shows the fruit volumes as obtained by the phase displacement Moiré method and processed by the Scilab. These volume values include the mean error obtained by means of calibrating object of regular geometry. The fluid displacement technique also generated the error calculation. Errors were applied to correct the sample dimensions.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi utilizado o método de deslocamento de fluido, onde foram obtidos os seguintes valores volumétricos encontrados na Tabela 1. Utilizando o software Scilab através de rotinas foram calculados os volumes do fruto conforme mostrados na Tabela 02 e comparados com os medidos através do deslocamento de fluido. Sendo que os valores obtidos no item TM são valores diretos obtidos através da técnica de *moiré* por deslocamento de fase e tratados no scilab obtendo o volume da amostra, o valor do erro médio utilizado é obtido através de um objeto que foi utilizado como calibrador cujas dimensões são conhecidas e que posteriormente foram utilizadas para calcular a variação sendo similar ocorrido com a medição de volume por deslocamento de fluido onde o valor do erro médio utilizado é também o do objeto calibrador que posteriormente foi utilizado para calcular a variação e corrigindo os valores das amostras.

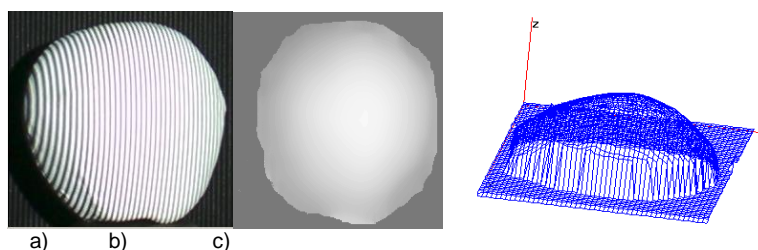


Fig. 2 - (a) projection of fringes in the sample, (b) increase in MDE, (c) three-dimensional model

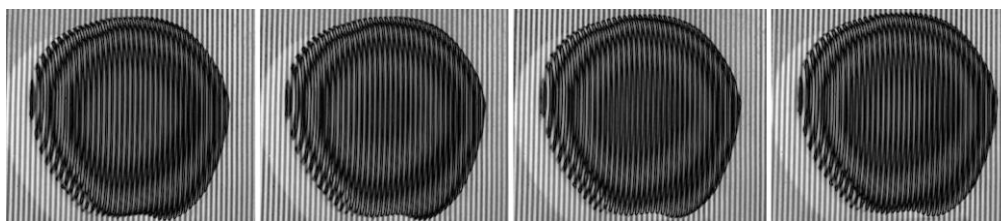


Fig. 3 - Result of subtraction of the grid plan with the sample

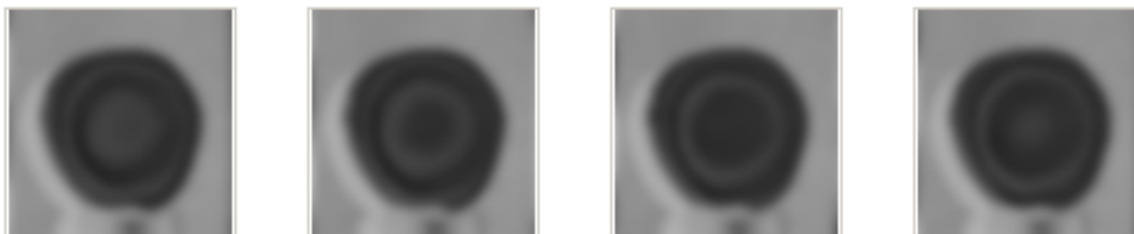


Fig. 4 - Result of subtraction of the grid plan with filtered sample image

Table 1

Volume obtained by immersion

Replication 1 (ml)	Replication 2 (ml)	Replication 3 (ml)	Replication 4 (ml)	Replication 5 (ml)	Mean (ml)	Mean (mm³)
400	380	400	390	390	392	392000

Table 2

Volume of the fruit model obtained through the Moiré method

Fruit Model	100lines/mm Ronchi (mm³)	100lines/mm Senoidal (mm³)	200lines/mm Ronchi (mm³)	200lines/mm Senoidal (mm³)	Mean (mm³)
TM	392201.520	389125.730	388780.070	386896.520	389250.960
Mean error (%)	3.91	2.21	1.86	0.61	1.340
Variation	15335.079	8599.679	7231.309	2360.069	5215.963
Corrected value	37866.441	380526.051	381548.761	38.536.451	384034.997
Displaced fluid volume	392000,000	392000,000	392000,000	392000,000	392000,000
Mean error (%)	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
Variation	7448	7448	7448	7448	7448
Corrected value	384552,000	384552,000	384552,000	384552,000	384.552,000

Variation between Methods	7685.559	4025.949	3003.239	15.549	517.003
% of variation after correction	1.998574817	1.046919177	0.780970923	0.004043347	0.1344429

The adjustment of variation between methods led to a value of 0.13 in percentage. Figures 5, 6 and 7 refer to the three-dimensional reconstitution of the apple fruit model as obtained by grid variation.

Foi aferida a variação entre os métodos obtendo-se um índice de 0,13 pontos percentuais médio entre as técnicas. Logo a seguir tem-se a reconstituição tridimensional da maçã utilizando as quatro variações sendo-as de tipos de grade e espessura.

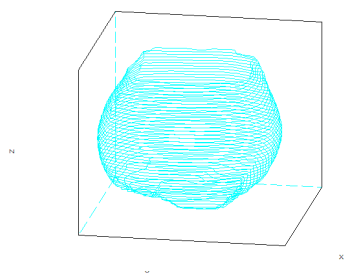


Fig. 5 – Three-dimensional reconstruction of the fruit model by the 100 lines/mm Ronchi grid

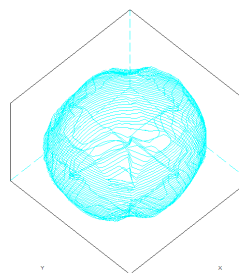


Fig. 6 – Three-dimensional reconstruction of the fruit model by the 100 lines/mm with sinusoidal grid

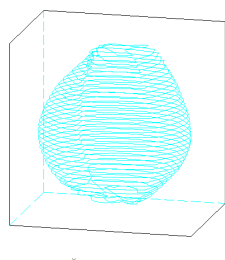


Fig. 7 - Three-dimensional reconstruction of the fruit model by the 100 lines/mm Ronchi grid of 200 linhas/mm

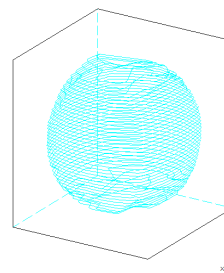


Fig. 8 - Three-dimensional reconstruction of the fruit model by the 200 lines/mm with sinusoidal grid

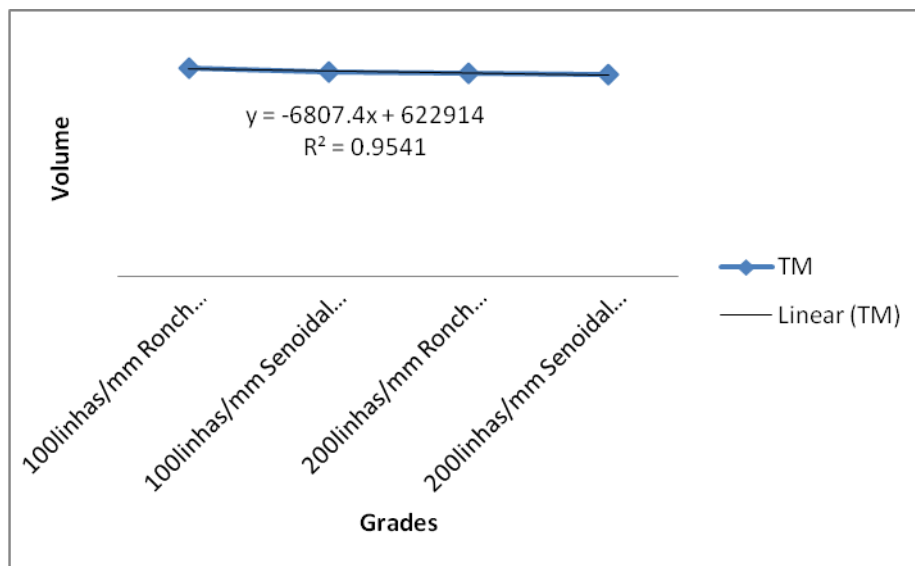


Fig. 9 - Correlation between the measured values

Referring to three-dimensional reconstitution the obtained results were shown to be satisfactory and useful to determine fruit volume. The application of different grids indicated the sinusoidal grid to generate better results.

CONCLUSIONS

Based on what it has been exposed before it can be concluded that Moiré method yields satisfactory results in determining fruit topography. These techniques allowed the determination of surface digital models; however they require specific computer programs. Sinusoidal grid with greater line density yielded better three-dimensional reconstruction. The Moiré method with phase displacement was noted to be of quick execution, causing no bruising on the testing material, mainly the results generated by the sinusoidal grid of higher density.

REFERENCES

- [1]. Huang P.S., Feng J., Fu-Pen C. (1999) - *Quantitative evaluation of corrosion by a digital fringe projection technique*, Optics and Lasers in Engineering, vol. 31, pg. 331-380;
- [2]. Lino A.C.L., Sanches J., Dal Fabbro I.M. (2008) - *Image processing techniques for lemons and tomatoes classification*, Bragantia, Campinas, vol. 67, no.3, pg. 785-789;
- [3]. Lino A.C.L. (2002) - *Application of Moiré Optical Techniques for the Study of Irregular Surface*, 86pg, Master Thesis in Agricultural Engineering. Faculty of Agricultural Engineering, State University of Campinas, SP, Brazil;
- [4]. Lino A.C.L., Dal Fabbro I.M., Rodrigues S. (2006) - *Fourier Transform Assisted Phase Shift Moiré Technique*, International Conference on Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment and Food

Os resultados da reconstrução tridimensional obtidos mostraram ser satisfatórios e úteis na determinação do volume de frutas. Quanto a aplicação de diferentes tipos de grades ópticas, a grade sinusoidal gerou melhores resultados.

CONCLUSÕES

Baseado no que foi acima exposto, as seguintes conclusões podem ser emitidas. A introdução das TM de deslocamento de fase determinou satisfatoriamente a topografia de um fruto. Estas técnicas permitiram a geração de modelos digitais da superfície das amostras utilizadas. A TM com deslocamento de fase é bastante rápida, reconhece automaticamente picos e vales, mas necessita do uso de programas computacionais específicos. Foi possível reconstruir as amostras tridimensionalmente sem qualquer dano ao material amostrado com detalhamento de pontos, sendo esses mais perceptíveis utilizando grade senoidal com maior número de linhas/mm.

REFERÊNCIAS

- [1]. Huang P.S., Feng J., Fu-Pen C. (1999) - *Avaliação Quantitativa de Corrosão por Meio de Projeção de Franjas Digitais*, Optics and Lasers in Engineering, vol. 31, p. 331-380;
- [2]. Lino A.C.L., Sanches J., Dal Fabbro I.M. (2008) - *Técnicas de Processamento de Imagens para Classificação de Limões e Tomates*, Bragantia, Campinas, v.67, n.3, p.785-789;
- [3]. Lino A.C.L. (2002) - *Técnica óptica de moiré visando a aplicação no estudo de superfícies irregulares*, 86 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas. Campinas;
- [4]. Lino A.C.L., Dal Fabbro I.M., Rodrigues S. (2006) - *Aplicação da Transformada de Fourier na Técnica de Moiré em Deslocamento de Grade*, Anais da Conferencia Internacional em Sistema de Informação

Technology (HAICTA 2006), 2006, Volos. Annals of the International Conference on Information Systems in Sustainable Agriculture, Agroenvironment And Food Technology (HAICTA 2006). Volos: University of Thessaly, vol. 3. pg. 784-791;

[5]. Noordam J.C. (2010) - *Innovative Applications in the Agro and Food industry*, <http://greenvision.wur.nl/>, 20 de junho;

[6]. Post D., Han B., Ifju P. (1994) - *High sensitivity Moiré: experimental analysis for mechanics and materials*, New York: Springer-Verlag.

[7]. Quan C., He X.Y., Wang C.F., Tay C.J, Shang H.M. (2001) - *Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting*, Optics Communication, vol. 189, pg. 21-29;

[8]. Smith Neto P., Fonseca E.A., Freitas G.H.F. (2006) - *Applicaton of Digital Shadow Moiré to Measurements of Human Body Perfilometry*, 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design, 2006, Porto. Mechanics and Materials in Design, Leça do Balio, Portugal: INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, vol. 1 pg. 63-71;

[9]. Smith Neto P., Magalhães Junior P.A.A. (2006) - *Determination of human body profile using digital shadow Moiré experimental technique*, Iberian Latin America Congress on Computational Methods in Engineering, 27 Cilamce, Belém-Pará. Cilamce2006. Belém, Pará: Universidade Federal do Pará;

[10]. Vecchio S.D., Campos I.L.P., Pinotti M., Sesselmann M. (2007) - *Measurement of three-dimensional profile free from the projection Moiré technique contours*, CONEM 2006. IV National Congress of Mechanical Engineering, Recife - PE, Proceedings of the IV National Congress of Mechanical Engineering. Rio de Janeiro - RJ. Brazilian Association of Mechanical Sciences and Engineering - ABCM, CDROM;

[11]. Wang Y. (2008) - *Shadow Moiré sensitivity increase by fringe shifting: phase-stepping*, <<http://www.warppfinder.com/hase.html>>, 03/09/2008.

[12]. Winterle P. (2000) - *Vectors and analytic geometry*, São Paulo, Makron Books, ISBN 85-346-1109-2;

[13]. Wyant J.C. (2000) - *Phase-Shifting Interferometry*, http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Short_Courses/SPIE_OpticalTesting/Part2.pdf, 20/05/2008;

[14]. Zhang Z., Towers C.E., Towers D.P. (2007) - *Phase and colour calculation in colour fringe projection*, J. Opt. A: Pure Appl. Opt., vol. 9, S81–S86;

[15]. Zhang Z., Towers C.E., Towers D.P. (2006) - *Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency Selection*, Optics Express. vol. 14, pg. 6444 - 6455.

em Agricultura Sustentável, Ambiente Agrícola e Tecnologia de Alimentos. (HAICTA 2006), 2006, Volos. (HAICTA 2006), Volos: University of Thessaly, v. 3. p. 784-791;

[5]. Noordam J.C. (2010) - *Aplicações Inovativas na Industria Agrícola e de Alimentos*, <http://greenvision.wur.nl/>, 20 de junho;

[6]. Post D., Han B., Ifju P. (1994) - *Moiré de Alta Sensibilidade: Análise Experimental para Mecânica dos materiais*, New York: Springer-Verlag;

[7]. Quan C., He X.Y., Wang C.F., Tay C.J, Shang H.M. (2001) - *Medida de Formas de Objetos Pequenos com Aplicação Projção de Franjas com LCD com Mudança de Fase*, Optics Communication. v. 189, p. 21-29;

[8]. Smith Neto P., Fonseca E.A., Freitas G.H.F. (2006) - *Aplicação da Técnica de Moiré de Sombra Digital na Medição do Perfil do Corpo Humano*, Quita Conferencia Internacional em Mecânica e Materiais em Projeto, Porto. Leça do Balio, Portugal: INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, v. 1. p. 63-71;

[9]. Smith Neto P., Magalhães Junior P.A.A. (2006) - *Determinação do Perfil do Corpo Humano com Aplicação da Técnica de Moiré de Sombra*, Congresso Ibero Latino Americano em Métodos Computacionais em Engenharia. - 27 Cilamce, Belém-Pará, Cilamce2006. Belém, Pará: Universidade Federal do Para;

[10]. Vecchio S.D., Campos I.L.P., Pinotti M., Sesselmann M. (2007) - *Medição do perfil tridimensional de contornos livres a partir da técnica de moiré de projeção*, CONEM 2006. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife – PE, Anais do IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro – RJ. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, CDROM;

[11]. Wang Y. (2008) - *Aumento da Sensibilidade da Técnica de Moiré de Sombra Através de Mudança de Franja e Incremento de Fase*, <http://www.warppfinder.com/phase.html>, 03/09/2008;

[12]. Winterle P. (2000) - *Vetores e geometria analítica*, São Paulo, Makron Books, ISBN 85-346-1109-2;

[13]. Wyant J.C. (2000) - *Interferometria de Mudança de Fase*, http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Short_Courses/SPIE_OpticalTesting/Part2.pdf, 20/05/2008;

[14]. Zhang Z., Towers C.E., Towers D.P. (2007) - *Calculo de Fase e Cor em Projção de Franjas Coloridas*. J. Opt. A: Pure Appl. Opt. v. 9, S81–S86, 2007.

[15]. Zhang Z., Towers C.E., Towers D.P. (2006) - *Sistema de Projção de Franjas Coloridas para Determinação de Forma e Cor com Aplicação Otimizada de Três Frequências Seleccionadas*. Optics Express. v. 14, v. 14, p. 6444 - 6455.