

## Review of Sensing Methods for Fruits and Vegetables in the Workfield and Industrial Environment

### Sensorização de Frutos e Legumes no Campo e em Meio Industrial – Estado de Arte

Marco Lopes - lopes.masl@gmail.com

Universidade da Beira Interior

Pedro Dinis Gaspar - dinis@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Fernando Bigares Charrua Santos - bigares@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Maria Paula Simões - mpaulasimoes@ipcb.pt

Instituto Politécnico de Castelo Branco

#### **Abstract**

This review describes the multiple working principles and technological solutions that have been developed and applied in features extraction of horticultural products, both in the field and industrial environments. This paper intends to contribute to the development and utilization of portable agricultural equipments. Currently the research on sensing technology for fruits and vegetables is focused on computer vision equipment and algorithms, being the main purpose to support the automation of various agricultural and industrial processes, although there is a lack of integration of these technologies in useful systems.

#### **Resumo**

Nesta revisão descrevem-se os vários princípios e soluções tecnológicas que têm vindo a ser desenvolvidas e aplicadas na extração de propriedades de produtos hortícolas, no campo e em meio industrial, pretendendo-se contribuir para a análise da exequibilidade tecnológica e económica do desenvolvimento e utilização de equipamentos agrícolas portáteis. O foco actual da investigação de tecnologias de sensorização de frutos e legumes centra-se nas tecnologias e algoritmos de visão computacional, tendo como principal objectivo contribuir para a automatização de variados processos agrícolas e industriais, no entanto são escassas as tentativas de integrar essas tecnologias em sistemas úteis.

#### **Keywords**

Sensors, Fruits, Vegetables, Technologies, Features extraction, Detection, Automation, Device, Portable, Agricultural

#### **Palavras-chave**

Sensor, Frutos, Legumes, Tecnologias, Extração de propriedades, Detecção, Automação, Dispositivo, Portátil, Agrícola

# Sensorização de Frutos e Legumes no Campo e em Meio Industrial - Estado de Arte

## 1. Introdução

No meio industrial, o controlo de qualidade dos produtos hortícolas e frutícolas tem vindo a tornar-se cada vez mais rigoroso. Como tal, é de extrema importância que se desenvolvam tecnologias e métodos que permitam proceder à seleção e separação dos mesmos consoante as suas características, com elevada precisão. No campo, tem sido crescente o interesse em desenvolver sistemas automatizados para as mais diversas operações, sobretudo devido às vantagens económicas associadas. Consequentemente têm sido investigadas soluções para esse efeito, no entanto, observa-se um foco nas grandes parcelas e produções. Para casos em que o espaço disponível se torna num factor limitativo ao uso de grandes equipamentos, a existência de equipamentos portáteis poderia permitir agilizar as operações e reduzir os encargos com mão-de-obra, mesmo que se tratassem de soluções semiautomáticas. Contudo, existe ainda escassez de soluções para certas operações, como é o caso da monda do fruto, que requer mão-de-obra especializada e que se trata de um processo moroso. Esta revisão de literatura descreve algumas soluções de sensorização de frutos e legumes, pretendendo-se contribuir para a análise da exequibilidade tecnológica do desenvolvimento e utilização de equipamentos agrícolas portáteis.

## 2. Dispositivos para a extração de propriedades no campo

Nesta secção é descrito o estado da arte de técnicas e tecnologias aplicadas no campo para a extração de propriedades externas e internas de produtos hortícolas e frutícolas. A secção é subdividida em função das características dos dispositivos analisados e do tipo de leitura que fornecem.

### 2.1 Medição Contínua

Os transdutores de deslocamento linear, transformadores diferenciais variáveis lineares (*Linear Variable Differential Transformers - LVDT's*), permitem não só o estudo das dinâmicas do crescimento dos frutos, mas também correlacionar as variações de tamanho dos frutos com fatores tais como a variação do conteúdo de água ao longo dos dias ou a variação de condições ambientais [1-3]. Outras soluções semelhantes baseiam-se na utilização de extensómetros (ver Fig.1a) [4,5].

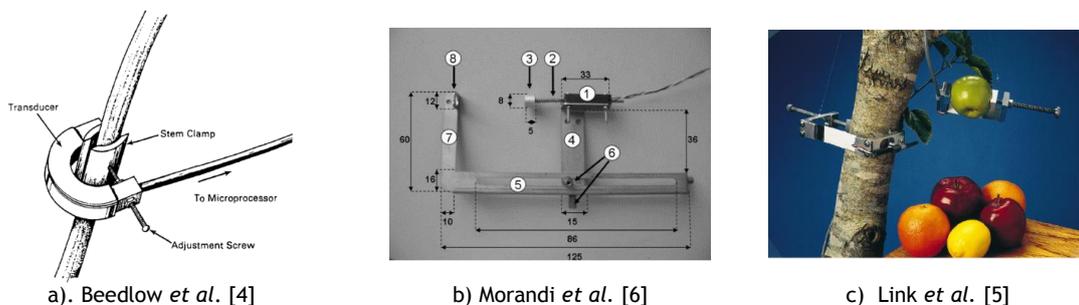


Fig. 1 - Dispositivos de medição contínua de diâmetros na árvore.

Morandi *et al.* [6] afirmam que existem soluções comerciais para este efeito, no entanto, o seu elevado preço não possibilita a proliferação da sua utilização, pois tanto para fins de

investigação como para a gestão de pomares, é necessário adquirir um elevado número de unidades. Nesse estudo foi descrito um sistema de baixo custo (cerca de 60€) com base num potenciómetro linear, ilustrado na Fig. 1b.

## 2.2 Medição Pontual Individualizada

Iraguen *et al.* [7] apresentaram o desenvolvimento de um dispositivo portátil para a medição do volume de cachos de uva nas videiras (ver Fig. 2a) através do controlo do deslocamento de ar. Os ensaios demonstraram um desvio padrão da medição de 6,4%. Laing *et al.* [8] desenvolveram um aparelho para a obtenção de uma estimativa do calibre de um fruto no campo, sendo constituído por 3 hastes com ângulo fixo entre si, formando um tripé invertido, e por um sensor ultrassónico de distância colocado na base do tripé, ilustrado na Fig.2b. Colocando-se o tripé de forma a posicionar o fruto no seu interior, fazendo-o deslizar até que o fruto fique totalmente assente nas hastes de tal forma a que não seja possível aproximá-lo mais da base do tripé, e uma vez que a distância a que o fruto bloqueia depende do seu diâmetro, sendo conhecida a geometria, obtém-se uma estimativa do calibre. Realizaram-se várias medições em limões, registando um erro quadrático médio da previsão de 2%.

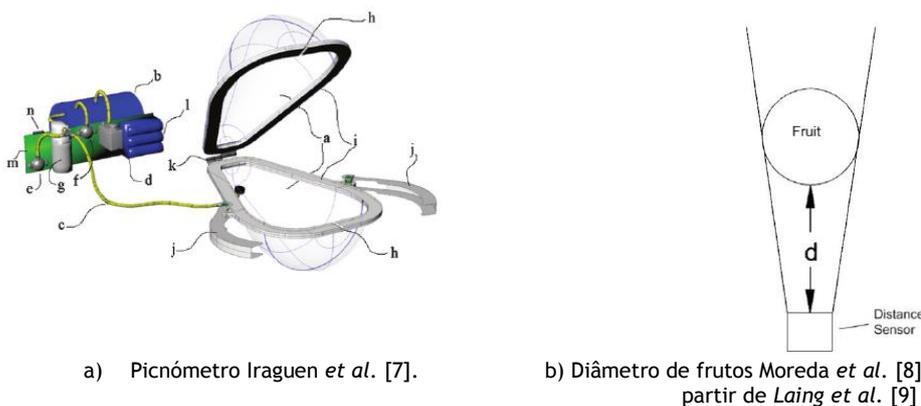


Fig. 2 - Dispositivos Portáteis.

## 2.3 Visão Computacional

As técnicas de visão computacional têm vindo a ser frequentemente investigadas quanto à sua aplicação no reconhecimento e extração de propriedades de frutos no campo. Inclusivamente já se realizaram algumas tentativas de conceção de sistemas de colheita automatizada de frutos baseados na recolha de imagem [10-16]. O único artigo de revisão encontrado acerca de deteção de frutos na árvore incluía exclusivamente técnicas de visão computacional [17]. Existem também sistemas de medição contínua de diâmetro baseados nesta tecnologia, tal como aquele apresentado por Pereira [18]. Zhao *et al.* [19] desenvolveram um algoritmo para a localização de maçãs nas árvores, através de imagens RGB (*Red-Green-Blue color mode*). O algoritmo era constituído por reconhecimento de contornos, filtros de valor limite, da percentagem de vermelho e de áreas dos contornos, ajuste de curvas dos círculos, de forma a determinar os centros dos frutos permitindo atribuir-lhes uma localização e filtros Laplacianos para a eliminação de falsos positivos com base na textura. Na imagem apresentada como exemplo (ver Fig. 3), o sistema permitiu identificar 18 em 20 frutos da árvore alvo. Em Zeng *et al.* [20] descreve-se um método para a medição do diâmetro de uvas nas videiras, com recurso a uma câmara com sensor CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), uma fonte de iluminação artificial e um computador, demonstrando uma elevada precisão, na ordem dos 7  $\mu\text{m}$  de erro absoluto. O algoritmo consistia na aplicação de um filtro passa-baixo Gaussiano para a redução do ruído e evidenciação de fronteiras, do método de limiarização de Otsu com o objectivo de determinar a posição de cada baga removendo o fundo, e de um filtro de limite de área para remover algum ruído que surgia na forma de pequenos objetos.



a) Imagem original



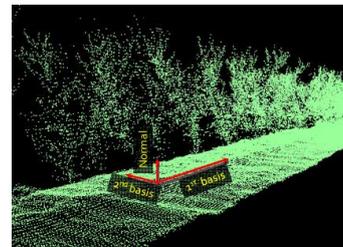
b) Imagem gerada.

Fig. 3 - Exemplo dos resultados de um sistema de identificação de maçãs por visão computacional num pomar [19].

Têm sido desenvolvidos métodos de segmentação específicos para a eliminação de folhas e ramos das imagens, por forma a isolar mais eficientemente os frutos para posterior avaliação de características [21-23]. Em Kohno *et al.* [24] foi apresentado o desenvolvimento de uma plataforma móvel para a avaliação de citrinos, sendo composta por uma câmara RGB e um espectrómetro NIR (*Near InfraRed*) que combinada com um localizador GPS (*Global Positioning System*) permitia através da colheita manual de frutos para amostragem, analisá-los no campo, e mapear as propriedades externas como o calibre e propriedades internas como o conteúdo de sólidos solúveis, ao longo do pomar. Com tecnologia mais avançada como é o caso do LIDAR (*Light Detection and Ranging*) foi possível realizar uma reconstrução 3D de todo um pomar. Um sistema constituído por um GPS, acelerómetros, e um conjunto de câmaras estereoscópicas permitiu obter imagens como a representada na Fig. 4b. Este sistema permite o controlo em tempo-real de uma máquina de monda de hastes flexíveis, assim como proceder ao mapeamento do pomar para propósitos relacionados com a gestão do mesmo, associando a cada ponto 3D propriedades como cor e textura, possibilitando a deteção de doenças ou o cálculo da densidade de flor [25, 26]. Aasted *et al.* [27] recorreram também à tecnologia LIDAR, como sensor para o controlo do ângulo de ataque de um equipamento de monda mecânica da flor de pessegueiro, acoplado a um trator.



a) Equipamento



b) Imagem Gerada

Fig. 4 - Sistema LIDAR para o mapeamento e descrição de pomares (Nielsen et al. [25]).

## 2.4 Nota Conclusiva

Os sistemas descritos na subsecção 2.1 são por natureza estáticos e requerem um posicionamento manual preciso para que possam fornecer uma leitura das dimensões dos frutos, pelo que apenas terão aplicabilidade para funções de monitorização. Os dispositivos apresentados na subsecção seguinte, demonstram já alguma portabilidade, mas requerem ainda um posicionamento manual individualizado para cada fruto a avaliar. Apesar de existir uma quantidade considerável de estudos relativos a métodos de identificação e extração de propriedades através de sistemas de visão computacional, e ainda que muitos dos autores afirmem que o objetivo desses trabalhos é suportar e promover o desenvolvimento da automatização de processos agrícolas, o número de estudos que demonstram efetivamente tentativas de desenvolvimento de soluções integrando as componentes de sensorização e de actuação é baixo. Adicionalmente, as poucas soluções existentes mostram-se ainda muito distantes de virem a poder substituir os métodos manuais equiparáveis, não tendo sido

encontrado nenhum equipamento com resultados que motivassem a sua comercialização. Deste modo, justifica-se a necessidade de investigação, não só de novos métodos e algoritmos de visão computacional, mas também de sistemas de controlo e actuadores. Nos sistemas baseados em visão computacional, os sensores encontram-se geralmente posicionados numa estrutura separada dos actuadores, o que os torna indicados apenas para o caso de serem totalmente automatizados, com suficiente versatilidade mecânica para actuar sobre qualquer um dos objectos detectados. Para operações relativamente simples, mas que requeiram algum tipo de avaliação e decisão, uma solução poderá passar por deixar que o posicionamento do equipamento face ao objecto sobre o qual se quer operar seja executado manualmente, permitindo aumentar a sua versatilidade, rapidez de actuação redução de custos. Neste caso, os sensores poder-se-ão encontrar junto aos actuadores, resultando também em designs mais compactos. Uma vez que recentemente se tem vindo a observar um foco da investigação em visão computacional, poderá ser útil que no futuro se investigue a viabilidade de outros tipos de sensores, para o tipo de aplicações aqui abordado.

### 3. Dispositivos para a extração de propriedades em ambiente industrial

Em ambiente industrial, as tecnologias de sensorização permitem por exemplo a separação do fruto colhido por calibre em sistemas *on-line*, ou operações mais complexas como a separação por conteúdo de sólidos solúveis ou de amido [28, 29]. Outros artigos de revisão abrangem um conjunto de características alargadas, com um foco no que diz respeito à avaliação de propriedades internas dos produtos [30, 33]. Moreda *et al.* [8] elaboraram uma revisão de literatura de tecnologias para a avaliação do calibre de vegetais, de forma não destrutiva e propuseram um sistema de classificação para este tipo de tecnologias com base no seu princípio de funcionamento, na qual se baseará a estrutura do texto nas seguintes subsecções.

#### 3.1 Medição de Folga

Gall [34] descreveu um algoritmo base e a formulação matemática necessária para a utilização de um sensor de anel óptico (Fig. 5). Os emissores e receptores apresentam uma resposta angular Lambertiana, ou seja, a intensidade do sinal foi considerada independente da posição do observador. Os emissores são disparados sequencialmente em torno do anel. Se não existir nenhum objecto a interceptar os feixes, estes são detectados pelo receptor correspondente. Se for introduzido um objecto, um ou mais receptores ficam “cegos” ao feixe do emissor correspondente. Cada dois feixes (ou cordas) adjacentes não interrompidos, podem ser utilizados para descrever as curvaturas de um objecto. O sistema de coordenadas utilizado tem como origem cada um dos transmissores. Os seus parâmetros são os ângulos entre transmissores adjacentes, entre o transmissor e correspondente receptor, o número de transmissores e o raio do anel. A informação foi codificada numa matriz cuja dimensão bi-dimensional é igual ao número de transmissores. Para cada transmissor  $n$ , é armazenada a posição relativa do correspondente receptor na forma vectorial  $m[n]$ . Foram impostas condições de funcionamento, como o facto de nunca poder coexistir mais do que um objecto no anel, ou a configuração de como devem ser dispostos os transmissores e receptores. A obtenção de uma reconstituição 3D seria possível de obter para uma velocidade deslocamento constante, a que corresponderia uma distância igualmente constante entre amostragens. Foi afirmado que este sistema possibilita aplicabilidade em tempo real, dada a necessidade de uma reduzida potência computacional que resulta do uso de vectores em vez da mais frequentemente utilizada pixelização. A área de secção do fruto pode ser calculada subtraindo à soma dos triângulos e segmentos de círculo que formam a folga entre o anel e o fruto, a área total do círculo formado pela periferia interna do anel. Além disso, é possível ainda calcular o volume de um objecto, através da reconstituição 3D. Moreda *et al.* [35] procederam à determinação das condições óptimas de funcionamento do sensor óptico de Gall como sistema *on-line* de calibração de frutos, construindo o sensor com LED's de

Arsenieto de Gálio (*Gallium arsenide* - GaAs) como emissores e fototransistores NPN como receptores. Estes concluíram que a velocidade óptima para a medição de dimensões longitudinais era de 2 m/s. Os mesmos autores realizaram ainda um estudo acerca dos efeitos da orientação dos frutos relativamente ao sensor, concluindo que na ocorrência de oscilações dos frutos durante as medições, as estimativas dos eixos deixavam de apresentar resultados razoáveis, mas a medição de volume permanecia com um coeficiente de determinação elevado (95%) Moreda *et al.* [36].

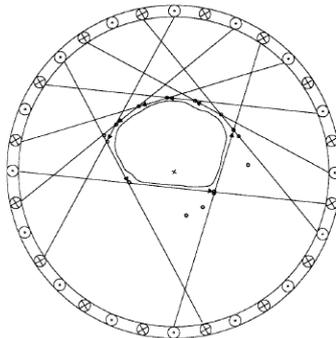


Fig. 5 - Anel óptico. Representação da fase final do algoritmo descartando as cordas redundantes (Gall [34]).

Também inserido nesta categoria, foi apresentado um sistema com base no fenómeno da ressonância de Helmholtz que apesar de apresentar uma elevada precisão na medição de volumes, não permite avaliar a geometria do que ocupa esse mesmo volume e além disso requer uma velocidade de avanço extremamente lenta, tendo sido testado com um máximo de 45 mm/s [37]. Kato [38] desenvolveu um sensor capacitivo para a estimativa do conteúdo de sólidos solúveis de melancias, em que a tensão de um medidor de capacidade variava com o volume dos frutos, obtendo uma precisão superior à do equipamento de ressonância de Helmholtz e permitindo uma operação a maiores velocidades, mas que em contrapartida exigia um posicionamento mais rigoroso dos frutos.

### 3.2 Obstrução de luz

Os sistemas desenvolvidos por Hahn [39] e são exemplos de equipamentos baseados no bloqueio da luz. Os tomates a serem avaliados passavam por vários pares de feixes luminosos, gerados por LED's e detectados por fotodiodos, sendo possível obter estimativas com base em diferentes configurações (ver Fig.6).

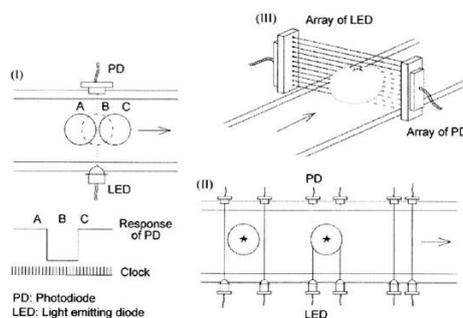


Fig. 6 - Sensores de calibre por bloqueio de feixes luminosos (Moreda *et al.* [8]) redesenhado a partir de Hwamoto & Chuma [40].

### 3.3 Visão Computacional

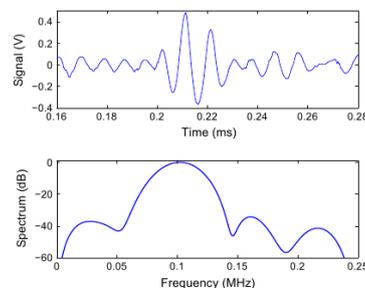
Além do tamanho e forma, os sistemas de visão computacional 2D são frequentemente utilizados para classificar os produtos de acordo com a sua cor e defeitos superficiais. Estas técnicas divergem sobretudo nos algoritmos utilizados para a extração de propriedades, como demonstrado na subsecção 2.3, existindo na literatura um grande número de estudos relativos à descrição e ensaio destes [19, 21, 41-54]. Em ambiente industrial tem vindo crescer a introdução de tecnologia de imagem multispectral e hiperespectral, para a simultânea extração de propriedades externas e internas [31, 55-60], assim como das técnicas de visão computacional 3D, por permitirem obter estimativas de volume mais precisas. As técnicas de visão computacional 3D podem-se dividir em activas e passivas, conforme a existência ou não de uma fonte luminosa artificial a incidir sobre o objecto a analisar. Estas baseiam-se na utilização de pistas como o movimento, imagem estereoscópica, sombras ou silhuetas para que se proceda a uma tentativa de estimar a forma da superfície, ou a orientação da superfície em cada ponto. Uma outra forma de fazer uma reconstrução 3D de um objecto passa pela utilização de sensores de alcance por tempo de voo, que permitindo obter leituras topográficas de superfícies. Estes sensores podem ser directamente utilizados para a determinação de formas e caracterização de texturas [31], ou em conjunto com câmaras comuns [8].

### 3.4 Tempo de Voo

Povey desenvolveu um extensivo trabalho sobre a sua implementação de sensores ultrassónicos na engenharia alimentar, descrevendo a teoria e os princípios que poderão ter utilidade, assim como a sua possível aplicação [61, 62, 63]. Estes permitem determinar propriedades internas e externas dos frutos. As frequências inferiores a 200 kHz e elevadas amplitudes têm-se demonstrado óptimas para a extracção de características em vegetais [33, 64, 65], já frequências entre os 0,5 MHz e 1 MHz, tipicamente utilizadas na medicina e outras indústrias, têm demonstrado em diversos produtos hortícolas e frutícolas, um alto coeficiente de atenuação [64]. Lee & Cho [66] desenvolveram um sistema com um único transdutor, para avaliação da firmeza de frutos fazendo incidir uma onda ultrassónica de 500 kHz sobre o fruto a avaliar, tendo em consideração o facto de que em meios mais rígidos a energia da onda se dissipa mais lentamente. Constatou-se que em condições controladas, a razão entre a amplitude do sinal emitido e a dos sinais reflectidos se mantinha constante mesmo com a variação da distância entre o sensor e o fruto. Morrison & Abeyratne [65] projectaram um sistema semelhante com um único transdutor de 100 kHz (Fig. 7), com o objectivo de permitir a avaliação de vários parâmetros de laranjas, como o conteúdo de água ou a firmeza, com a particularidade de apresentar alta portabilidade.



(a) Equipamento.



(b) Sinais obtidos.

Fig. 7 - Sistema portátil de análise de propriedades internas e externas por ultrassom (Morrison & Abeyratne [65]).

### 3.5 Outros

Na última categoria definida por Moreda *et al.* [8] incluem-se técnicas que recorrem a ondas electromagnéticas, ou à imagem por ressonância magnética, sendo que esta última tem vindo a ser frequentemente estudada quanto à sua viabilidade para sistemas on-line de deteção de defeitos e avaliação de qualidades internas [67], frequentemente recorrendo a equipamento médico, que opera com campos magnéticos de alta intensidade (acima de 2T). Tratando-se de hardware dispendioso, aparenta não justificar economicamente a sua aplicação para a simples determinação de dimensões [8], mostra-se portanto pouco provável a sua adopção [31]. Uma outra técnica que tem sido frequentemente investigada para a avaliação de propriedades internas é a espectroscopia NIR, com ondas electromagnéticas entre os 780 nm e os 2500 nm. Ao penetrar no produto, as características espectrais são alteradas devido à dispersão e a processos de absorção, consoante a composição química do produto e a sua microestrutura [68]. É previsível que num futuro próximo se venha a observar a miniaturização desta tecnologia, permitindo a sua utilização no campo [69]. A radiação terahertz (região final do infravermelho), à qual várias substâncias demonstram uma opacidade significativamente inferior, comparativamente à radiação das regiões adjacentes, apesar de ser não-ionizante, tem vindo também a ganhar interesse [33], tendo sido já aplicada na avaliação de propriedades de frutos, nomeadamente na deteção de resíduos de pesticidas [70].

### 3.6 Nota Conclusiva

As tecnologias que recorrem a ondas electromagnéticas de frequências elevadas requerem um consumo energético também elevado e o equipamento necessário para a sua emissão é geralmente volumoso e oneroso, pelo que não aparentam apresentar particular interesse para o desenvolvimento de equipamentos portáteis. A medição da folga entre uma área delimitada conhecida e o objecto a ser avaliado, assim como os sensores de tempo de voo, poder-se-iam demonstrar como óptimas soluções para implementação em dispositivos portáteis, no entanto carecem de investigação quanto à sua aplicação para a sensorização de produtos hortícolas e frutícolas. A visão computacional permanece como sendo a tecnologia mais comum para a determinação de propriedades externas de frutos e legumes, sendo que para cada aplicação em específico os resultados podem ser otimizados recorrendo a diferentes algoritmos de processamento de imagem. No entanto, estes sistemas em contexto industrial avaliam apenas um produto de cada vez, requerendo um posicionamento preciso dos mesmos sem nunca existir qualquer tipo de obstrução, nesse sentido não demonstram características com relevância significativa para o desenvolvimento de equipamentos portáteis.

### Referências Bibliográficas

- [1] Tukey, L.: "A linear electric device for continuous measurement and recording of fruit enlargement and contraction" *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, Vol. 84 n° (1964), pp. 653-660.
- [2] Klepper, B.; Browning, V.D.; Taylor, H.M.: "Stem diameter in relation to plant water status" *Plant Physiology*, Vol. 48 n° 6 (1971), pp. 683-685.
- [3] Higgs, K.; Jones, H.: "A microcomputer-based system for continuous measurement and recording fruit diameter in relation to environmental factors" *Journal of Experimental Botany*, Vol. 35 n° 11 (1984), pp. 1646-1655.
- [4] Beedlow, P.A.; Daly, D.S.; Thiede, M.E.: "A new device for measuring fluctuations in plant stem diameter: Implications for monitoring plant responses: Note." *Environmental monitoring and assessment*, Vol. 6 n° 3 (1986), pp. 277-82.
- [5] Link, S.; Thiede, M.; Van Bavel, M.: "An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter" *Journal of Experimental Botany*, Vol. 49 n° 326 (1998), pp. 1583-1587.
- [6] Morandi, B.; Manfrini, L.; Zibordi, M.; Noferini, M.; Fiori, G.; Grappadelli, L.C.: "A low-cost device for accurate and continuous measurements of fruit diameter" *HortScience*, Vol. 42 n° 6 (2007), pp. 1380-1382.
- [7] Iraguen, V.; Guesalaga, A.; Agosin, E.: "A portable non-destructive volume meter for wine grape clusters" *Measurement Science and Technology*, Vol. 17 n° 12 (2006), pp. N92.



- [8] Moreda, G.; Ortiz-Cañavate, J.; Garcia-Ramos, F.J.; Ruiz-Altisent, M.: "Non-destructive technologies for fruit and vegetable size determination-a review" *Journal of Food Engineering*, Vol. 92 n° 2 (2009), pp. 119-136.
- [9] Laing, A.; Smit, Q.; Mortimer, B.; Tapson, J.: "Ultrasonic fruit sizing device" *Journal of the South African Acoustics Institute*, Vol. 6 n° (1995), pp. 60-65.
- [10] Jiménez, A.R.; Jain, A.K.; Ceres, R.; Pons, J.: "Automatic fruit recognition: a survey and new results using range/attenuation images" *Pattern recognition*, Vol. 32 n° 10 (1999), pp. 1719-1736.
- [11] Scarfe, A.J.; Flemmer, R.C.; Bakker, H.; Flemmer, C.L.: Development of an autonomous kiwifruit picking robot. [Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009. 4th International Conference on], pp. 380-384.
- [12] Ceres, R.; Pons, J.; Jimenez, A.; Martin, J.; Calderon, L.: "Design and implementation of an aided fruit-harvesting robot (AgriBot)" *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 25 n° 5 (1998), pp. 337-346.
- [13] Baeten, J.; Donné, K.; Boedrij, S.; Beckers, W.; Claesen, E.: Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester. [Field and Service Robotics], pp. 531-539.
- [14] Li, P.; Lee, S.; Hsu, H.-Y.: "Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems" *Procedia Engineering*, Vol. 23 n° (2011), pp. 351-366.
- [15] Edan, Y.: "Design of an autonomous agricultural robot" *Applied Intelligence*, Vol. 5 n° 1 (1995), pp. 41-50.
- [16] De-An, Z.; Jidong, L.; Wei, J.; Ying, Z.; Yu, C.: "Design and control of an apple harvesting robot" *Biosystems engineering*, Vol. 110 n° 2 (2011), pp. 112-122.
- [17] Jimenez, A.; Ceres, R.; Pons, J.; others: "A survey of computer vision methods for locating fruit on trees" *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 43 n° 6 (2000), pp. 1911-1920.
- [18] Pereira, C.A.P.: "Utilización de imágenes digitales para medición del diámetro de frutos de Mandarina (Citrus reticulata) en crecimiento." *Revista Ciencia y Tecnología*, Vol. 6 n° 1 (2013), pp. 1-9.
- [19] Zhao, J.; Tow, J.; Katupitiya, J.: On-tree fruit recognition using texture properties and color data. [IROS 2005], pp. 263-268.
- [20] Zeng, Q.; Liu, C.; Miao, Y.; Fei, S.; Wang, S.: A machine vision system for continuous field measurement of grape fruit diameter. [Intelligent Information Technology Application, 2008. IITA'08. Second International Symposium on], pp. 1064-1068.
- [21] Yang, L.; Dickinson, J.; Wu, Q.; Lang, S.: A fruit recognition method for automatic harvesting. [Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2007. M2VIP 2007. 14th International Conference on], pp. 152-157.
- [22] Patel, H.; Jain, R.; Joshi, M.: "Automatic segmentation and yield measurement of fruit using shape analysis" *International Journal of Computer Applications*, Vol. 45 n° 7 (2012), pp. 19-24.
- [23] Bulanon, D.; Kataoka, T.; Ota, Y.; Hiroma, T.: "AE—automation and emerging technologies: a segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest" *Biosystems Engineering*, Vol. 83 n° 4 (2002), pp. 405-412.
- [24] Kohno, Y.; Kondo, N.; Iida, M.; Kurita, M.; Shiigi, T.; Ogawa, Y.; Kaichi, T.; Okamoto, S.: "Development of a mobile grading machine for citrus fruit" *Engineering in agriculture, Environment and Food*, Vol. 4 n° 1 (2011), pp. 7-11.
- [25] Nielsen, M.; Slaughter, D.C.; Gliever, C.; Upadhyaya, S.: Orchard and tree mapping and description using stereo vision and lidar. [International Conference of Agricultural Engineering].
- [26] Nielsen, M.; Slaughter, D.; Gliever, C.: Stereo vision blossom mapping for automated thinning in peach. [Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on], pp. 499-504.
- [27] Aasted, M.; Dise, R.; Auxt Baugher, T.; Schupp, J.R.; Heinemann, P.H.; Singh, S.: "Autonomous Mechanical Thinning Using Scanning LIDAR" n° (2011).
- [28] Hoffmann, T.; Wormanns, G.; Füll, C.; Poller, J.: "A system for determining starch in potatoes online" n° (2005).
- [29] Jordan, R.B.; Clark, C.J.: "Sorting of kiwifruit for quality using drop velocity in water" *Transactions of the ASAE*, Vol. 47 n° 6 (2004), pp. 1991-1998.
- [30] Alfathi, M.S.M.; Shariff, A.R.M.; Abdullah, M.Z.; Marhaban, M.H.B.; Saeed, O.M.B.: "The application of internal grading system technologies for agricultural products-Review" *Journal of Food Engineering*, Vol. 116 n° 3 (2013), pp. 703-725.
- [31] Ruiz-Altisent, M.; Ruiz-Garcia, L.; Moreda, G.; Lu, R.; Hernandez-Sanchez, N.; Correa, E.; Diezma, B.; Nicola'i, B.; Garcia-Ramos, J.: "Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review" *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 74 n° 2 (2010), pp. 176-194.
- [32] Opara, U.L.; Pathare, P.B.: "Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review" *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 91 n° (2014), pp. 9-24.
- [33] Butz, P.; Hofmann, C.; Tauscher, B.: "Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis" *Journal of Food Science*, Vol. 70 n° 9 (2005), pp. R131-R141.
- [34] Gall, H.: "A ring sensor system using a modified polar coordinate system to describe the shape of irregular objects" *Measurement Science and Technology*, Vol. 8 n° 11 (1997), pp. 1228.
- [35] Moreda, G.; Ortiz-Cañavate, J.; Garcia-Ramos, F.; Homer, I.; Ruiz-Altisent, M.: "Optimal operating conditions for an optical ring sensor system to size fruits and vegetables" *Applied engineering in agriculture*, n° (2005).
- [36] Moreda, G.; Ortiz-Cañavate, J.; Garcia-Ramos, F.; Ruiz-Altisent, M.: "Effect of orientation on the fruit on-line size determination performed by an optical ring sensor" *Journal of food engineering*, Vol. 81 n° 2 (2007), pp. 388-398.
- [37] Nishizu, T.; Ikeda, Y.; Torikata, Y.; Manmoto, S.; Umehara, T.; Mizukami, T.: "Automatic, continuous food volume measurement with a Helmholtz resonator" n° (2001).
- [38] Kato, K.: "Electrical density sorting and estimation of soluble solids content of watermelon" *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 67 n° 2 (1997), pp. 161-170.
- [39] Hahn, F.: "PH—Postharvest Technology: Automatic Jalapeño Chilli Grading by Width" *Biosystems engineering*, Vol. 83 n° 4 (2002), pp. 433-440.



- [40] Hwamoto, M.; Chuma, Y.: Recent studies on development in automated citrus packinghouse facility in Japan. [Proceedings of the International Society of Citriculture/[International Citrus Congress, November 9-12, 1981, Tokyo, Japan; K. Matsumoto, editor]].
- [41] Blasco, J.; Aleixos, N.; Moltó, E.: "Machine vision system for automatic quality grading of fruit" *Biosystems Engineering*, Vol. 85 n° 4 (2003), pp. 415-423.
- [42] Afrisal, H.; Faris, M.; Utomo, P.; Grezelda, L.; Soesanti, I.; Andri, F.; others: Portable smart sorting and grading machine for fruits using computer vision. [Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA), 2013 International Conference on], pp. 71-75.
- [43] Zhang, B.; Huang, W.; Li, J.; Zhao, C.; Fan, S.; Wu, J.; Liu, C.: "Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review" *Food Research International*, Vol. 62 n° (2014), pp. 326-343.
- [44] Ninomiya, K.; Kondo, N.; Chong, V.; Monta, M.: Machine vision systems of eggplant grading system. [Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 7-8 October 2004 Conference, Kyoto, Japan].
- [45] Brosnan, T.; Sun, D.-W.: "Improving quality inspection of food products by computer vision--a review" *Journal of Food Engineering*, Vol. 61 n° 1 (2004), pp. 3-16.
- [46] Vaidya, A.; Pujari, D.; Desai, H.; Borse, K.; Patel, S.: "Leaf Recognition-A Technical Review" n° (n.d.).
- [47] Ji, B.; Zhu, W.; Liu, B.; Ma, C.; Li, X.: Review of recent machine-vision technologies in agriculture. [Knowledge Acquisition and Modeling, 2009. KAM'09. Second International Symposium on], pp. 330-334.
- [48] Dang, H.; Song, J.; Guo, Q.: A Fruit Size Detecting and Grading System Based on Image Processing. [Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2010 2nd International Conference on], pp. 83-86.
- [49] Studman, C.: "Computers and electronics in postharvest technology—a review" *Computers and electronics in Agriculture*, Vol. 30 n° 1 (2001), pp. 109-124.
- [50] Mustafa, N.; Gandi, S.; Sharrif, Z.; Ahmed, S.: Real-time implementation of a fuzzy inference system for banana grading using DSP TMS320C6713 platform. [Research and Development (SCoReD), 2010 IEEE Student Conference on], pp. 324-328.
- [51] Wulfssohn, D.; Gundersen, H.J.G.; Vedel Jensen, E.B.; Nyengaard, J.R.: "Volume estimation from projections." *Journal of microscopy*, Vol. 215 n° Pt 2 (2004), pp. 111-20.
- [52] Menguito, B.P.; Nagata, M.; Qixin, C.; others: "Study on sorting system for strawberry using machine vision" *Journal of JSAM*, Vol. 62 n° 1 (2000), pp. 100-110.
- [53] Nagata, M.; Cao, Q.; Bato, P.; Shrestha, B.; Kinoshita, O.: Basic study on strawberry sorting system in Japan. [1997 ASAE Annual International Meeting Technical Papers, Paper], pp. 49085-9659.
- [54] Garc'ia-Ramos, F.J.; Valero, C.; Homer, I.; Ortiz-Cañavate, J.; Ruiz-Altisent, M.: "Non-destructive fruit firmness sensors: a review" *Spanish Journal of Agricultural Research*, Vol. 3 n° 1 (2005), pp. 61-73.
- [55] Lorente, D.; Aleixos, N.; Gómez-Sanchis, J.; Cubero, S.; Garc'ia-Navarrete, O.L.; Blasco, J.: "Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment" *Food and Bioprocess Technology*, Vol. 5 n° 4 (2012), pp. 1121-1142.
- [56] Burger, J.: Hyperspectral NIR image analysis. Ph. D. thesis, pub. epsilon. sl. se, Umeå, Sweden.
- [57] Aleixos, N.; Blasco, J.; Navarrón, F.; Moltó, E.: "Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors" *Computers and electronics in agriculture*, Vol. 33 n° 2 (2002), pp. 121-137.
- [58] Blasco, J.; Aleixos, N.; Gómez-Sanchis, J.; Moltó, E.: "Recognition and classification of external skin damage in citrus fruits using multispectral data and morphological features" *Biosystems engineering*, Vol. 103 n° 2 (2009), pp. 137-145.
- [59] Lathuiliere, A.; Mansouri, A.; Voisin, Y.; Marzani, F.; Gouton, P.: "Stereoscopic system for 3D reconstruction using multispectral camera and LCD projector" *The Imaging Science Journal*, Vol. 54 n° 1 (2006), pp. 19-28.
- [60] Wang, N.-N.; Sun, D.-W.; Yang, Y.-C.; Pu, H.; Zhu, Z.: "Recent Advances in the Application of Hyperspectral Imaging for Evaluating Fruit Quality" *Food Analytical Methods*, n° (2015), pp. 1-14.
- [61] Povey, M.J.: "Ultrasonics of food" *Contemporary Physics*, Vol. 39 n° 6 (1998), pp. 467-478.
- [62] Povey, M.: "Ultrasonics in food engineering Part II: Applications" *Journal of Food Engineering*, Vol. 9 n° 1 (1989), pp. 1-20.
- [63] Povey, M.; McClements, D.: "Ultrasonics in food engineering. Part I: Introduction and experimental methods" *Journal of Food Engineering*, Vol. 8 n° 4 (1988), pp. 217-245.
- [64] Mizrach, A.: "Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre-and postharvest processes" *Postharvest biology and technology*, Vol. 48 n° 3 (2008), pp. 315-330.
- [65] Morrison, D.; Abeyratne, U.: "Ultrasonic technique for non-destructive quality evaluation of oranges" *Journal of Food Engineering*, Vol. 141 n° (2014), pp. 107-112.
- [66] Lee, S.; Cho, B.-K.: Evaluation of the firmness measurement of fruit by using a non-contact ultrasonic technique. [Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on], pp. 1331-1336.
- [67] Patel, K.K.; Khan, M.A.; Kar, A.: "Recent developments in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce—an overview" *Journal of Food Science and Technology*, Vol. 52 n° 1 (2015), pp. 1-26.
- [68] Nicolai, B.M.; Beullens, K.; Bobelyn, E.; Peirs, A.; Saeys, W.; Theron, K.I.; Lammertyn, J.: "Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review" *Postharvest Biology and Technology*, Vol. 46 n° 2 (2007), pp. 99-118.
- [69] Walsh, K.B.: "Commercial adoption of technologies for fruit grading, with emphasis on NIRS" *Information and technology for sustainable fruit and vegetable production, FRUTIC*, Vol. 5 n° (2005),
- [70] Ma, Y.; Wang, Q.; Wang, X.; Wang, H.: Research of pesticide residues on fruit by terahertz spectroscopy technology. [International Conference on Optical Instruments and Technology (OIT2011)], pp. 820125-820125.