



IPL

escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Politécnico de Leiria

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Eng.^a Eletrotécnica – Eletrónica e Telecomunicações

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS STEREO
PARA LASER SPECKLE**

FILIFE JOSÉ MARQUES SALGUEIRO

Leiria, julho de 2022



IPL

escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Politécnico de Leiria
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Eng.^a Eletrotécnica – Eletrónica e Telecomunicações

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS STEREO
PARA LASER SPECKLE**

FILIFE JOSÉ MARQUES SALGUEIRO

Número: 2182456

Dissertação realizada sob orientação do Professor Doutor Pedro António Amado de Assunção e do Professor Doutor Rui Manuel da Fonseca Pinto, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, julho de 2022

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento de uma dissertação de mestrado é uma jornada, que apresenta alguns desafios, incertezas e alguns percalços, mas apesar de se tratar de um processo individual, incorpora o contributo de várias pessoas indispensáveis para a concretização deste processo. Desta forma apresento o meu agradecimento a todas aqueles que estiveram diretamente e/ou indiretamente envolvidos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Pedro António Amado de Assunção, pela orientação prestada, disponibilidade e prontidão ao longo do projeto, assim como sugestões propostas no esclarecimento de dúvidas e clarificação de conceitos. Agradecer também a generosidade na transmissão de conhecimento, no âmbito da interação com o *hardware* utilizado, assim como no processamento implementado.

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Fonseca-Pinto, pela orientação prestada, disponibilidade e prontidão ao longo do projeto, assim como sugestões propostas no esclarecimento de dúvidas e clarificação de conceitos. Agradecer também a generosidade na transmissão de conhecimento, no âmbito da caracterização do fenómeno do *laser speckle*, no tipo de análises implementadas no estudo do comportamento do *laser speckle* e possíveis abordagens de processamento.

Ao Instituto de Telecomunicações, Delegação de Leiria, pelas condições de acolhimento e bolsa de investigação no âmbito do projeto UID/EEA/50008/2019 – L3S, que contribuíram para apoiar e suportar este trabalho do ponto de vista científico e financeiro.

Não poderia deixar de expressar a minha gratidão à minha família por todo o apoio prestado ao longo de toda a minha vida académica, assim como na concretização da presente dissertação.

Por fim, também pretendo expressar o meu agradecimento a todos os meus colegas, amigos e conhecidos por todo o encorajamento e troca de impressões que contribuíram para a concretização deste processo.

RESUMO

O *Speckle* é o fenômeno de interferência produzido pela interação de frentes de onda de luz coerente, que ocorre devido à reflexão difusa da luz após incidência numa determinada superfície. O efeito resultante pode ser capturado através de um sistema de aquisição de vídeo adequado, e caracteriza-se por imagens contendo padrões de interferência, que posteriormente podem ser processadas para determinar descritores específicos adequados a caracterizar este fenômeno em condições diversas. Com o objetivo de explorar as potencialidades deste tipo de fenômeno e suas aplicações, nos últimos anos têm sido desenvolvidos alguns trabalhos no âmbito da aquisição *stereo*.

Esta dissertação descreve o trabalho realizado com a concepção e o desenvolvimento de um sistema de aquisição de imagens *stereo* de *laser speckle*, que permite flexibilizar a disposição física dos respectivos componentes e realizar eventos experimentais que permitam a caracterização deste fenômeno em relação à variação dos parâmetros do sistema. Desta forma, o trabalho dividiu-se nas seguintes etapas: concepção do sistema físico; criação de uma *interface* gráfica, que facilita a realização dos eventos experimentais; análise dos resultados obtidos.

Para poder realizar a aquisição de imagens foram utilizadas duas câmaras monocromáticas da Basler com interface GigE. Foi efetuado um estudo sobre as configurações das câmaras utilizadas e como é que os respectivos parâmetros iriam influenciar a aquisição das imagens. Este estudo incluiu os modos de funcionamento do sensor utilizado, sequências dos eventos de aquisição e envio das frames para serem armazenadas e qual o tipo de sinal a utilizar para garantir que as *frames stereo* são adquiridas de modo síncrono.

A concepção da interface gráfica permite a configuração dos parâmetros das câmaras que são relevantes para a realização das experiências de aquisição, seguindo-se a definição da disposição do material utilizado (câmaras, laser, lente que direciona o laser e o difusor). Com as imagens adquiridas foi realizada uma análise de conteúdo baseada num dos tipos de processamento normalmente usados para este tipo de fenômeno, mais concretamente a análise do contraste. Tendo como base a abordagem LASCA (Laser Speckle Contrast Analysis) optou-se por realizar uma análise das imagens, ao longo do tempo, recorrendo a dois descritores (factor de correlação e a

média de uma janela definida do valor da diferença das imagens de contraste do *laser speckle*) para caracterizar a variação da informação entre as imagens correspondentes às vistas *stereo*.

Através dos resultados obtidos, podemos concluir que a variação dos parâmetros em estudo produzem resultados distintos ao nível da informação que se adquire nas imagens da esquerda e da direita, pelo que tais parâmetros têm de ser definidos aquando do processo de aquisição em *speckle 3D*. O parâmetro cuja a variação apresenta mais influência nos resultados é o tempo de exposição definido em cada experiência. De facto, o aumento do valor deste parâmetro na experiência de aquisição, implica a diminuição do *frame rate* utilizado (isto é uma consequência do modelo da câmara utilizada).

Globalmente, o trabalho realizado no âmbito desta dissertação permitiu desenvolver um sistema experimental para realizar estudos específicos com imagens *stereo de laser speckle*. Os resultados demonstram as funcionalidades do sistema e a sua utilidade para a realização de estudos futuros com imagens *stereo de laser speckle*.

ABSTRACT

Speckle is the interference phenomenon resulting from the interaction between coherent light wave fronts right after scattering due to reflection in a surface. The ensuing effect can be captured and recorded as video images in a computational system. Then it can be characterized by typical patterns that correspond to specific descriptors of this phenomenon. To exploit the potential associated with this type of phenomenon several works have been recently presented based on stereo image acquisition.

The work carried out within the scope of this dissertation concerns the design and development of a laser speckle stereo image acquisition system, which is capable of providing flexible arrangements of the physical setup to allow characterisation of the phenomenon across a wide range of system parameters. To this aim, the work was divided in two stages: firstly the design and implementation of the system and also the development of a graphical user interface. Secondly, the development, test and evaluation of methods typically used for speckle processing.

Two monochrome cameras (Basler) GigE interface were used. The operational modes of these cameras were first studied along with the corresponding parameters that have influence on the speckle image acquisition. This includes the operational modes of the image sensor, acquisition events, frame sincronisation and transmission to storage computer. The graphical user interface allows the configuration of cameras by setting the relevant parameters for each acquisition event. After capturing several different images, these were processed with methods commonly used to analyse speckle images, such as the Laser Speckle Contrast Analysis (LASCA) combined with coorelation and average intensity of the image difference between righ and left views. From the results obtained, one can conclude that parameters variation have influence on the visual information that is captured by the right and left camera, thus the parameter set must be well defined before any aquisition event. It was found that the exposure time is the most relevant parameter that is most influences the results due to its impact on the frame rate.

Overall the work developed in this dissertation lead to the development of an experimental system to carry out specific studies with stereo laser speckle. The

results demonstrated the functionalities of the system and its usefulness for further studies with this technology.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Abreviaturas	xix
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Aquisição <i>stereo</i> e <i>laser speckle</i> : conceitos fundamentais	5
2.1 Conceitos sobre aquisição Stereo	6
2.1.1 Disparidade	7
2.1.2 Convergência	7
2.1.3 Passive Stereo Vision	8
2.1.4 Active Stereo Vision	9
2.1.5 Multiple Stereo Vision	10
2.2 Laser Speckle	11
2.2.1 Tipos de padrão de <i>laser speckle</i>	11
2.2.2 Laser Speckle Contrast Analysis (LASCA)	14
2.3 Tipos de sensores de imagem e modo de funcionamento	16
3 Trabalho Relacionado	19
3.1 Obtenção de representação 3D por Stereo Laser Speckle	19
3.2 Análise de dissimilaridade	21
3.3 Medição tridimensional microscópica	22
3.4 Detecção de nuvens de pontos 3D com alta densidade, utilizando sistema de ajuste de speckle	25

4	Metodologia	29
4.1	Parâmetros do Material Utilizado	29
4.1.1	Especificações das Câmaras	30
4.1.2	Parâmetros do Switch de rede	30
4.2	Parâmetros a configurar para a transmissão das imagens	31
4.3	Configuração do frame rate de aquisição	32
4.3.1	Modo de acionamento de leitura do sensor	35
4.4	Processo de aquisição	37
4.5	Equipamento desenvolvido	38
4.5.1	Suporte da câmara	38
4.5.2	Suporte do difusor e da lente	39
4.5.3	Ligação do sinal de relógio	40
4.6	Disposição do material implementado	42
4.7	Software Desenvolvido	43
4.8	Procedimento experimental	45
4.9	Processamento prévio de imagem	47
4.9.1	Tratamento aplicado a cada vista	49
4.9.2	Análise das frames correspondentes a cada vista	51
4.9.3	Análise de zonas correspondentes entre as frames de cada vista	51
5	Resultados	53
5.1	Análise da relevância de pré-processamento	54
5.2	Variação da distância entre a lente que direciona o feixe de luz coerente e o difusor	59
5.3	Variação do $f/\#$	61
5.4	Variação do ângulo panorâmico das câmaras	62
5.5	Variação da distância entre câmaras	64
5.6	Variação da distância entre a câmara e a face do objeto	65
5.7	Variação do tempo de exposição	67
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	69
6.1	Conclusões	69
6.2	Contribuição científica	70
6.3	Proposta de trabalho futuro	71
	Bibliografia	73

Anexos

A	Parâmetros configuráveis da interface gráfica	79
B	Guia de utilização das câmaras	81
C	Guia de utilizador da interface desenvolvida	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Relação geométrica entre profundidade e disparidade (retirado de [7]).	7
Figura 2	Configuração de duas câmaras stereo: (A) Configuração em paralelo; (B) Configuração em convergência (retirado de [15]).	8
Figura 3	<i>Passive Stereo Vision</i> (retirado de [16]).	9
Figura 4	<i>Active Stereo Vision</i> (retirado de [16]).	10
Figura 5	Exemplos de formação de <i>speckle</i> objetivo (a) e de <i>speckle</i> subjetivo (retirado de [19]).	12
Figura 6	Processo de obtenção de formação de uma imagem de <i>speckle</i> subjetivo, através de uma lente. Consequência da interferência das ondas de luz coerente espalhadas numa superfície (retirado de [18]).	13
Figura 7	Exemplos de laser <i>speckle</i> , tendo como base um laser helium-neon (retirado de [20]).	13
Figura 8	Diagrama de métodos estatísticos de LSCI. (a) sLSCI , (b) tLSCI e (c) stLSCI . O tamanho original da imagem é representado por $C \times R$ pixéis. A janela, a ciano, contribui com os valores para calcular o valor do contraste. Este valor encontra-se representado a azul (retirado de [17]).	15
Figura 9	Conversão de fóton para elétron (esquerda) e conversão de fóton para valor de tensão (direita) ([22]).	17
Figura 10	Sistema de aquisição para reconstrução 3D (retirado de [2]).	19
Figura 11	Resultados da reconstrução 3D da mão, do cotovelo e do pé (vista ventral e dorsal). (a) Nuvem de pontos 3D; (b) Malha 3D gerada através da nuvem de pontos; (c) Distância da câmara do sistema stereo à zona. Retirado de [2].	20
Figura 12	Sistema de aquisição <i>stereo</i> (esquerda); Parâmetros da câmara, lente difusora e laser (direita). Retirado de [14]. . . .	21
Figura 13	Exemplos de ROI para aquisição stereo (retirado de [14]). . .	22
Figura 14	Mapas SOM treinados com descritores extraídos da câmara esquerda, (a) estado oclusivo, (b) estado a hiperémico. Retirado de [14].	22

Figura 15	Mapas SOM treinados com descritores extraídos da câmara direita, (a) estado oclusivo, (b) estado a hiperémico. Retirado de [14].	22
Figura 16	a) Configuração experimental utilizada para realizar medições 3D; b) Módulo de projeção (DLP); c) <i>Speckle</i> digital aleatório gerado pelo DLP; d) <i>Ceramic Step Master 300C</i> com valores nominais de <i>steps</i> de 20, 50, 100 e 300 μm ; e) <i>Ceramic Step Master 10C</i> com valores nominais de <i>steps</i> de 1, 2, 5 e 10 μm . Retirado de [23].	23
Figura 17	Assinalado a vermelho, encontra-se três conjuntos de cilindros utilizados para realizar os testes de reconstrução 3D. Imagens que correspondem à vista da esquerda (a)-(c). Imagens que correspondem à vista da direita (d)-(f). Resultados da reconstrução 3D (g)-(i). Retirado de [23].	24
Figura 18	Exemplo da distribuição do erro de diferentes nuvens medidas. 'Max' corresponde ao erro absoluto máximo, 'Avg' corresponde ao erro médio e 'Std' corresponde ao desvio padrão. (a, b) Distribuição do erro das nuvens de pontos, no nível superior e no nível inferior, do <i>Step Master</i> de 300 μm . (c, d) Distribuição do erro das nuvens de pontos, no nível superior e no nível inferior, do <i>Step Master</i> de 100 μm . Retirado de [23].	25
Figura 19	Exemplo de sistema <i>stereo</i> implementado em [24]. Retirado de [24].	26
Figura 20	Confrontação da densidade (a)-(d), número de vizinho presentes num raio de 3mm e histograma da densidade (e)-(h). Retirado de [24].	27
Figura 21	Ferramenta utilizada para calcular o máximo <i>frame rate</i> possível, exemplo de configuração que permite um <i>frame rate</i> máximo de 5 fps (a), exemplo de configuração que permite um <i>frame rate</i> máximo de 50 fps (b), exemplo de configuração que permite um <i>frame rate</i> máximo de 100 fps (c).	32
Figura 22	Gráfico temporal de uma exposição controlada através de um sinal de disparo por <i>hardware</i> , retirado de [25].	34
Figura 23	Gráfico temporal de (a) <i>Rolling Shutter Mode</i> , (b) <i>Global Reset Release Shutter Mode</i> , (c) <i>Global Shutter</i> , retirado de [25].	36

Figura 24	Diagrama do processo de aquisição.	37
Figura 25	Suporte inferior da câmara esquerda (a), parte superior do suporte com indicador de ângulo de rotação (b), com eixos ortogonais representados.	39
Figura 26	Suporte completo da câmara esquerda, com indicativo de ângulo e com eixos ortogonais representados.	39
Figura 27	Suporte implementado com <i>rail</i> (a), que permite a deslocação do suporte do difusor (b).	40
Figura 28	Exemplo de implementação do suporte desenvolvido com a aplicação da respetiva lente e difusor.	40
Figura 29	Esquema elétrico da PCB desenvolvida para distribuição do <i>hardware trigger</i>	41
Figura 30	<i>Board</i> desenvolvida para distribuição do <i>hardware trigger</i>	41
Figura 31	Exemplo de implementação da <i>board</i> desenvolvida para distribuição do <i>hardware trigger</i>	42
Figura 32	Disposição do material necessário para aquisição de imagens <i>speckle</i>	42
Figura 33	Aspeto gráfico da GUI desenvolvida para configurar os parâmetros das câmaras.	44
Figura 34	Diagrama de interação entre a interface desenvolvida e as câmaras (adaptado da documentação que acompanha a API utilizada).	45
Figura 35	Representação dos ângulos da câmara direita (Θ_R) e da câmara esquerda (Θ_L), assim como a identificação do respetivo ângulo de vergência (Θ_V). Retirado de [26].	46
Figura 36	<i>Pipeline</i> do processamento realizado às imagens de calibração para cada câmara.	47
Figura 37	<i>Pipeline</i> do processamento realizado às imagens <i>raw</i> obtidas da câmara da esquerda.	49
Figura 38	Transformação do plano da imagem para uma superfície plana. Retirado de [27].	50
Figura 39	<i>Pipeline</i> do processamento realizado às imagens <i>raw</i> obtidas da câmara da direita.	50
Figura 40	<i>Pipeline</i> do processamento realizado às imagens de contraste (LSCI) obtidas de cada vista de modo a obter a caracterização do fator de correlação ao longo do tempo da experiência de aquisição.	51

Figura 41	<i>Pipeline</i> do processamento realizado às imagens de contraste (LSCI) obtidas de cada vista de modo a obter a caracterização do valor médio da diferença absoluta dos valores de contraste, numa janela definida, ao longo do tempo da experiência de aquisição.	52
Figura 42	Exemplo de legenda implementada nos gráficos.	54
Figura 43	Factor de correlação entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de <u>imagens retificadas</u>	54
Figura 44	Factor de correlação entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de <u>imagens não retificadas</u>	55
Figura 45	Factor de correlação entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de <u>imagens retificadas</u>	55
Figura 46	Factor de correlação entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de <u>imagens não retificadas</u>	56
Figura 47	Diferença dos valores, das imagens retificadas e não retificadas através da implementação da homografia, do factor de correlação entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL' (diferença entre os valores dos gráficos apresentados na Figura 45 e da Figura 46).	56
Figura 48	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de <u>imagens retificadas</u>	57
Figura 49	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de <u>imagens não retificadas</u>	57
Figura 50	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames</i> LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de <u>imagens retificadas</u>	58

Figura 51	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de <u>imagens não retificadas</u>	58
Figura 52	Diferença dos valores, das imagens retificadas e não retificadas através da implementação da homografia, da média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL' (diferença entre os valores dos gráficos apresentados na Figura 50 e da Figura 49).	59
Figura 53	Factor de correlação entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos.	60
Figura 54	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos.	60
Figura 55	Factor de correlação entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'f/#' e tempos de exposição distintos.	61
Figura 56	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'f/#' e tempos de exposição distintos.	62
Figura 57	Factor de correlação entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'A' e tempos de exposição distintos.	63
Figura 58	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'A' e tempos de exposição distintos.	63
Figura 59	Factor de correlação entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'DC' e tempos de exposição distintos.	64
Figura 60	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'DC' e tempos de exposição distintos.	65
Figura 61	Factor de correlação entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'D' e tempos de exposição distintos.	66
Figura 62	Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'D' e tempos de exposição distintos.	67
Figura 63	Factor de correlação entre <i>frames LSCI</i> com diferentes valores de 'ET'.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 64 Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3,
entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'ET'. 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros da câmara (adaptado de [25]).	30
----------	--	----

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Tridimensional.
ADC	Analog to Digital Converter.
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor.
DLP	Digital Light Processor.
LASCA	Laser Speckle Contrast Analysis.
LSCI	Laser Speckle Contrast Imaging.
LSFG	Laser Speckle Flowgraphy.
sLSCI	spatial Laser Speckle Contrast Imaging.
stLSCI	spatiotemporal Laser Speckle Contrast Imaging.
tLSCI	temporal Laser Speckle Contrast Imaging.

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

O *Speckle* consiste num fenómeno de interferência que resulta da interação de frentes de onda de luz coerente que ocorrem após o espalhamento. O efeito resultante pode ser capturado através de um sistema de aquisição de vídeo adequado, e caracteriza-se pela obtenção de padrões típicos, constituídos pela interação construtiva ou destrutiva das frentes de onda. Estes padrões podem ser adquiridos no formato de imagens digitais e posteriormente processados com o objetivo de caracterizar o processo que dá origem à interferência através de descritores específicos e adaptados a este fenómeno.

Para efeito de processamento de imagem, tradicionalmente o efeito de *Speckle* contém ruído (como nos casos dos sinais de Tomografia de Coerência Ótica - OCT em que se utilizam ultrassons, ou mesmo em sistemas de radar do tipo *Synthetic-aperture radar* - SAR), e portanto é necessário adoptar procedimentos para aumentar a relação sinal-ruído. Com a evolução da tecnologia ótica e associada aos sensores, tem sido possível utilizar a informação que está inerente a este tipo de sinal para identificar características (estáticas ou dinâmicas) da superfície refletora das frentes de onda, por exemplo na caracterização de biomateriais, ou em vários tipos de aplicações biomédicas [1].

Com o objetivo de explorar as potencialidades deste tipo de fenómeno em termos de aplicações, nos últimos anos têm sido desenvolvidos alguns trabalhos no âmbito da aquisição *stereo*. Este tipo de aquisição permite obter informação de profundidade e desta forma a técnica passa a ganhar mais versatilidade e abre a possibilidade de adquirir informação de evolução temporal e caracterização da superfície refletora [2].

No entanto, para que a potencialidade da técnica possa evoluir, persistem questões relacionadas com a otimização do sistema de aquisição de imagens, e também relacionadas com o processamento das vistas, que importa estudar. Assim, neste trabalho foi desenvolvido um setup experimental versátil que permite operacionalizar

várias condições de teste para estudar o efeito das principais variáveis que influenciam a aquisição *stereo* de imagens *Laser Speckle*.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A maioria dos trabalhos que se apresentam na literatura relacionados com *Laser Speckle* utilizam sistemas clássicos de aquisição de imagens com um *setup* de câmara única e processamento de imagem através de descritores estatísticos [3]. Em termos de aplicações na área do BioSpeckle (aplicações da imagem obtida por Laser Speckle para descrever /caraterizar fenómenos biológicos ou biomédicos) podemos encontrar aplicações que vão desde o estudo da germinação de sementes à deteção de padrões de microcirculação cutânea [4]. Em todos os casos a caraterização é realizada através do padrão de atividade, sendo assim uma caraterização dinâmica de um determinado processo/fenómeno. A aquisição em *stereo* permitirá acrescentar mais uma dimensão ao estudo destes fenómenos biológicos, onde a estrutura 3D pode ser um elemento diferenciador quando combinada com o padrão de atividade.

Deste modo, o objetivo principal deste trabalho é a conceção e desenvolvimento de um *setup* para a aquisição *stereo* de imagens de *Laser Speckle*, que seja versátil e permita a realização de estudos experimentais no sentido de compreender a influência das principais variáveis de aquisição. Adicionalmente pretende-se validar este *setup* testando um conjunto de variáveis de aquisição com importância conhecida para os resultados, em particular perceber e/ou quantificar a informação relativa ao fenómeno do *laser speckle* entre a câmara da esquerda e a câmara da direita.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresenta uma estrutura composta por 6 capítulos. No presente capítulo, de introdução, são apresentadas algumas considerações, enquadramento e pertinência do problema a estudar, bem como a motivação e objetivos.

O capítulo 2 apresenta conceitos que são centrais ao *stereo laser speckle* e também conceitos sobre a visão *stereo*, incluindo, incluindo as principais técnicas de processamento de imagens em *laser speckle*, assim como breve descrição sobre as tecnologias referentes aos diferentes tipos de sensores utilizados nos sistemas de aquisição.

O capítulo 3 apresenta alguns trabalhos realizados no âmbito do *stereo laser speckle*, e descreve algumas montagens de equipamento (*hardware*) para a obtenção deste tipo de imagens.

De seguida, no capítulo 4 apresenta-se a metodologia implementada é feita referência ao material e *pipeline* de processamento implementado. No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos seguidos da discussão dos mesmos. Por último no capítulo 6, encontra-se um resumo do trabalho desenvolvido e algumas perspectivas de futuros desenvolvimentos no âmbito dos resultados obtidos neste trabalho.

AQUISIÇÃO *STEREO* E *LASER SPECKLE*: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A capacidade de experienciar a percepção em ambiente 3-D é das características mais importantes da visão do ser humano. Em 1692 o pintor francês G.A Bois-Clair mostrou que ao pintar quadros com duas imagens distintas (uma imagem para cada olho) conseguia criar a sensação de 3-D. Em 1838, Charles Wheatstone apresentou o espelho estereoscópico, um dispositivo que permitia visualizar, estereoscopicamente por dois espelhos angulados, duas perspectivas diferentes. Desde 1849, a visualização de fotografias em 3-D tornou-se muito popular devido à apresentação da primeira câmara estereoscópica por David Brewster [5].

Os irmãos Lumière, em 1903, apresentaram em Paris as primeiras imagens com movimento, mostrando assim o primeiro vídeo em 3-D na cidade de Los Angeles em 1922. Após 6 anos, em 1928, John Logie Baird realizou a primeira montagem de 3DTV utilizando o conceito de estereoscopia [5].

A visão stereo binocular é um método simples e flexível na aquisição de informação tridimensional de uma cena. No entanto, o desafio neste método é a correspondência de um determinado ponto da cena nas imagens das duas câmaras. Uma outra questão, que é geométrica do stereo, é a relação entre a precisão e a facilidade de correspondência, que pode ser atenuada com a utilização de várias câmaras ou várias localizações para as câmaras, conhecida por *multibaseline* stereo [6].

Para se fazer aquisição stereo são necessárias duas câmaras e um processo de sincronização. Por exemplo em [7] utilizou-se um *Trigger* analógico (um sinal de relógio) em vez de um *Trigger* por Software. Em [8] é desenvolvido um método de correspondência de disparidade para eventos de *stereo*, que usa o movimento da câmara para sincronizar os eventos de *stream* no tempo. O método consiste numa interpolação temporal dos eventos, ao mesmo tempo, um baixo custo de correspondência (*lightweight matching cost*). Para isso, é utilizada uma elevada resolução temporal dos eventos para remover o efeito de *Blur* relativo ao movimento de um evento usando a estimativa do movimento na cena. Posteriormente, é usada a equação do campo de movimento em conjunto com a velocidade da câmara, com disparidades e outros parâmetros, para efetuar a correção das imagens.

Na grande maioria dos casos a aquisição stereo tem por objetivo fazer a reconstrução 3D da realidade que está a ser capturada mas vai variando o número de câmaras. Em [9] é apresentado um esquema de reconstrução de uma superfície 3D, baseado na combinação da correspondência stereo e na projeção de padrões. Nesse caso foram utilizadas apenas 2 câmaras para a aquisição da informação stereo, enquanto que em [10] foram utilizadas 9 câmaras. No caso do trabalho apresentado em [10], onde o objetivo principal consiste na aquisição de vídeo de baixa complexidade com base em múltiplas câmaras e processadores, são geradas imagens de ultra-alta resolução espacial para um campo de visão de 180 graus.

A utilização de vídeo stereo na área da saúde tem tido mais expressão em cirurgia por laparoscopia. Por exemplo em [11] foi proposta a utilização da Tomografia Computadorizada (TC) 3D em conjunto com imagens stereo para tornar perceptível a dispersão de profundidade ao cirurgião. Em [12] demonstra-se a possibilidade de colocar duas câmaras e a fonte de luz necessária para a reconstrução e visualização 3D do local cirúrgico.

Outra das utilizações do stereo em imagem médica tem sido no âmbito da dermatologia. Para estudar um determinado tipo de psoríase, em [13] recorre-se a imagens stereo para originar os mapas de disparidade e consecutivamente nuvens de pontos de um braço, de modo a distinguir a superfície afetada pela psoríase da área afetada por eritema.

Em contraste com os exemplos anteriores em que é utilizada a luz refletida e em que os fenómenos do ruído são filtrados, nos últimos anos tem sido utilizado o fenómeno de interferência relativo à interação das frentes de onda refletidas para fazer reconstrução 3D conhecido como *Laser Speckle*. Em [2] o stereo é usado para fazer reconstrução 3D e em [14] para fazer análise de dissimilaridade entre as vistas.

Neste capítulo apresentam-se alguns conceitos relacionados com a aquisição de imagens *stereo*. De seguida, é abordado o fenómeno do *laser speckle*, como também, alguns dos métodos mais utilizados para a análise deste fenómeno. Por fim, são apresentados os diferentes tipos de sensores de imagem utilizados em câmaras digitais, seguido uma breve comparação e discussão sobre os mesmos.

2.1 CONCEITOS SOBRE AQUISIÇÃO STEREO

Existem algumas definições e conceitos relativos ao stereo que são importantes no contexto deste trabalho, e por esse motivo apresentam-se em seguida.

2.1.1 *Disparidade*

A disparidade é a diferença entre a localização de um objeto nas imagens capturadas num sistema de aquisição com duas câmaras. A Figura 1 apresenta um exemplo ilustrativo deste conceito. Os valores da profundidade Z podem ser geometricamente relacionados com os valores da disparidade d , de acordo com a Figura 1 [7].

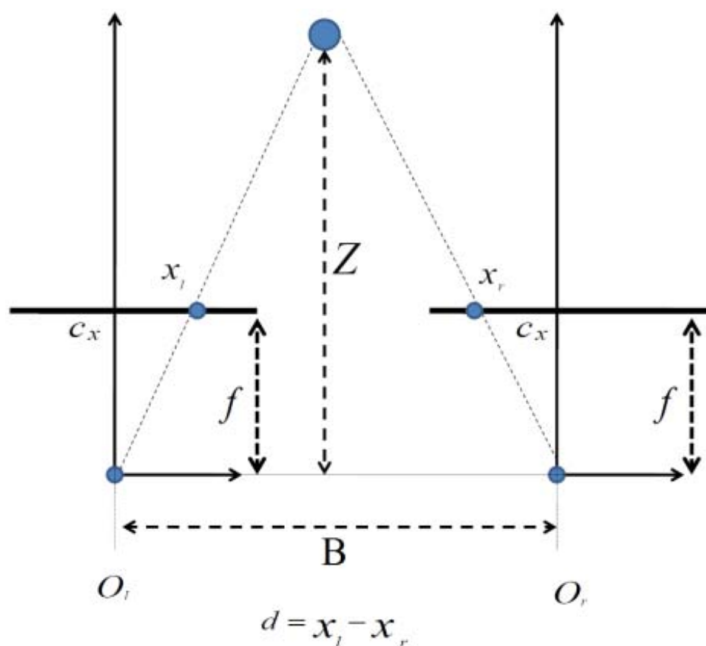


Figura 1: Relação geométrica entre profundidade e disparidade (retirado de [7]).

Designam-se por (x_l, y_l) as coordenadas do objeto na imagem da esquerda e por (x_r, y_r) as coordenadas do objeto na imagem da direita. Na equação 1, encontra-se relação entre disparidade (representada por $x_l - x_r$) e a profundidade [7]. Na qual, B representa a distância entre as câmaras e f a distância focal.

$$Z = \frac{fB}{x_l - x_r} \quad (1)$$

2.1.2 *Convergência*

Trata-se do fenómeno de ajuste ao eixo ótico. É o que acontece quando os olhos giram e orientam (ou convergem) os seus eixos óticos no objeto de interesse. O ângulo gerado pelo cruzamento dos eixos óticos no ponto de convergência, é designado de ângulo de convergência.

Na Figura 2 (A), pode-se observar que os eixos óticos das duas câmaras convergem no infinito. Ao contrário do sistema visual humano, a disparidade num sistema stereo varia consoante a distância da câmara e o objeto observado. Ao fixar a distância entre duas câmaras e direcioná-las para um ponto de foco fixo, como pode ser visualizado na Figura 2 (B), a correspondência entre as imagens adquiridas pelas duas câmaras só existe se o objeto a observar estiver dentro de campo de visão de ambas, caso contrário haverá zonas de oclusão onde não é possível determinar a disparidade.

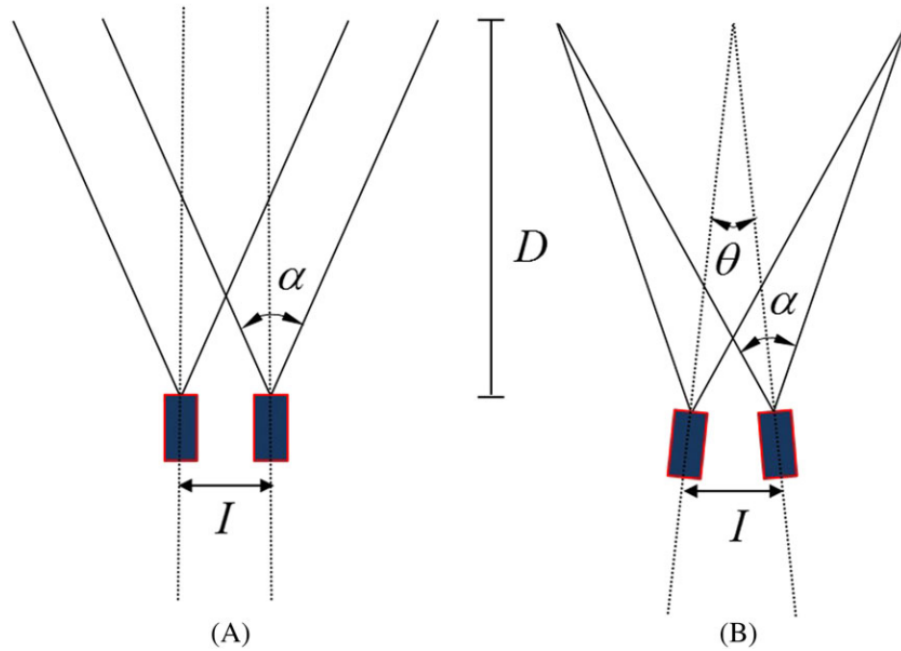


Figura 2: Configuração de duas câmaras stereo: (A) Configuração em paralelo; (B) Configuração em convergência (retirado de [15]).

2.1.3 *Passive Stereo Vision*

O *Passive Stereo Vision* (PSV) permite a deteção do limite de uma superfície com baixa rugosidade. A utilização de duas câmaras permite derivar a profundidade de um objeto através da triangulação; ainda assim, o limite da profundidade não é capturado. Devem ser utilizadas no mínimo duas câmaras ou imagens, com o intuito de capturar um limite (ou seja, uma superfície plana) e uma profundidade [16]. A localização da câmara para cada imagem pode ser utilizada para calcular a geometria 3D do objeto digitalizado, correlacionando um grupo de pixéis das duas imagens (área a sombreado na Figura 3), por exemplo.

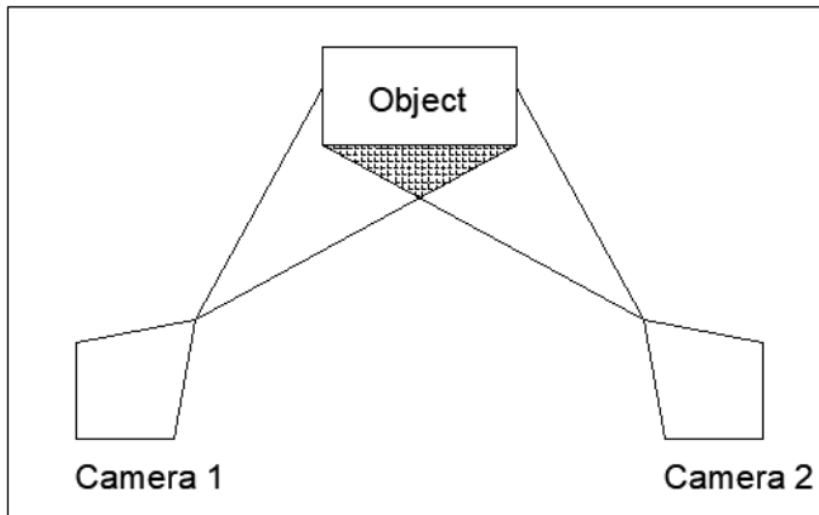


Figura 3: *Passive Stereo Vision* (retirado de [16]).

2.1.4 *Active Stereo Vision*

O *Active Stereo Vision* (ASV) é similar ao PSV, mas permite a aquisição de informação de forma dinâmica (movimento da câmara e do objeto). Deste modo, surge a possibilidade de gerar uma imagem 3D mais detalhada uma vez que são combinadas e processadas várias *frames*. A correspondência dinâmica das imagens é feita através da fonte de luz, uma vez que as câmaras detetam as *grid lines* que se aproximam com o decorrer do movimento [16]. Esta dinâmica pode ser visualizado na Figura 4.

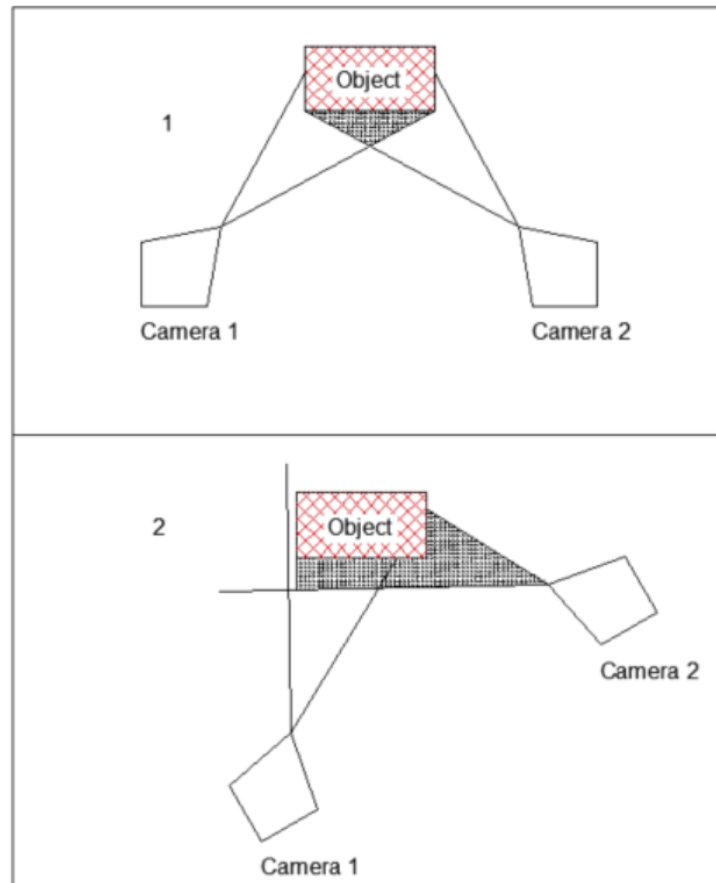


Figura 4: *Active Stereo Vision* (retirado de [16]).

2.1.5 *Multiple Stereo Vision*

De modo a aumentar a precisão da imagem 3D adquirida e aumentar o ângulo de aquisição, o *Multiple Stereo Vision* (MSV) utiliza muitas câmaras para aumentar a aquisição de imagens. Como o MSV utiliza muitas câmaras, as *grid lines* permitem que a sincronização das câmaras seja mais fácil [16] e conseqüentemente a minimização de erros causados por descontinuidades. Apesar do MSV aumentar a precisão da imagem 3D capturada, existe uma relação entre a correlação dos pixels e a precisão da imagem 3D gerada [16].

Pode-se concluir que a linha de base e disparidade são proporcionais a uma distância constante. Ou seja, o aumento da distância entre as câmaras aumenta a disparidade, o que leva ao aumento da possibilidade da ocorrência de falsas correspondências.

2.2 LASER SPECKLE

Quando uma luz coerente incide numa superfície, com uma rugosidade superior ao comprimento de onda da luz emitida, esta é refletida e origina o *speckle* [14]. Quando as frentes de onda são refletidas, acontece uma alteração aleatória na fase das frentes de onda coerentes na superfície do objeto iluminado, obtendo-se o padrão de *speckle* objetivo. O tamanho do grão de *speckle* é determinado pelo comprimento de onda da luz, dimensões do feixe de laser e a distância entre a superfície refletora e o plano de observação [2].

As variações na superfície atingida pelo feixe de luz coerente, provocam alteração no padrão de *speckle* gerado [14]. Esta característica demonstra o elevado potencial deste fenómeno, uma vez que permite a caracterização de um padrão de *speckle* subjetivo [14]. A caracterização dinâmica dos meios de dispersão em relação à variação temporal da dispersão do campo de intensidade pode ser registada por uma câmara durante um determinado intervalo de tempo finito (ou seja, tempo de exposição) [14].

Realizado o processo de aquisição e armazenamento de imagens de *laser speckle*, o passo seguinte consiste no cálculo de descritores que permitam uma caracterização das superfícies refletora (tendo estas características estáticas ou dinâmicas). O descritor contraste que mede a variação das intensidades de *speckle* relativamente à média é o descritor mais utilizado e inicialmente proposto apresentando duas variações (espacial e temporal).

O descritor contraste (C) do *speckle* representa o *ratio* entre o desvio padrão da intensidade (σ) e a média da intensidade ($\langle I \rangle$), do padrão de *speckle* [17]. Sendo este fator caracterizado pela equação 2.

$$C \equiv \frac{\sigma}{\langle I \rangle} \quad (2)$$

2.2.1 Tipos de padrão de laser speckle

Existem dois tipos de padrões *laser speckle*. Começando pelo *speckle* objetivo (*objective speckle*), este é formado quando um feixe de luz (produzido por uma fonte coerente) incide e se projeta em qualquer superfície [18], onde não se encontra qualquer tipo de sistema de aquisição de imagem envolvido. Este tipo de *speckle*

apenas pode ser observado indiretamente, ou seja, quando não existe qualquer tipo de lente inserido no processo de observação (ainda que seja a própria lente do olho humano), tratando-se assim de um *speckle* com uma utilidade limitada do ponto de vista experimental [18]. O segundo tipo de *speckle*, é chamado de *speckle* subjetivo (*subjective speckle*). A razão deste nome deve-se ao facto de este fenómeno ser criado quando é formada uma imagem, utilizando uma lente, do objeto iluminado pela fonte de luz coerente [18]. Na Figura 5 encontra-se exemplificado o processo de como são formados os diferentes tipos de *speckle* (objetivo e subjetivo).

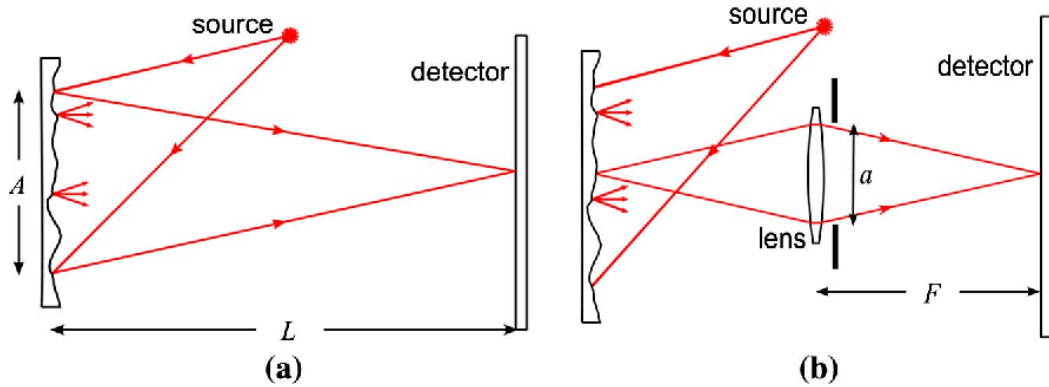


Figura 5: Exemplos de formação de *speckle* objetivo (a) e de *speckle* subjetivo (retirado de [19]).

Na Figura 6 pode visualizar-se um modelo simples de como o padrão de *speckle* subjetivo é formado, através da interferência das ondas de luz que atravessam uma lente [18]. Neste exemplo um feixe de luz coerente é direcionado a uma superfície com relevo de um objeto, provocado assim a dispersão das ondas que chegam à superfície [18]. Parte dessas ondas refletidas pela superfície, são captadas e direcionadas por uma lente de forma a que estas ondas sejam captadas por um sensor de imagem ou um filme fotográfico, por exemplo [18]. Assumindo que a distância entre a superfície e a lente, assim como, a distância entre a lente e a tela (ou sensor de imagem), estejam ajustadas de modo que se possa obter uma imagem focada [18]. Desta forma, as ondas de luz espalhadas por qualquer ponto da superfície do objeto são direcionadas a um ponto correspondente na imagem formada pelo sensor de imagem (que capta a informação luminosa direcionada pela lente) [18]. Este fenómeno encontra-se caracterizado na Figura 6, onde as ondas refletidas no ponto A (representadas a tracejado na Figura 6) da superfície do objeto, são redirecionadas pela lente para o ponto A' da imagem (ou do sensor de imagem) [18]. A distância percorrida por essas ondas, até chegar ao sensor, influencia a fase de chegada das mesmas [18]. Esta diferença de fases, faz com que a interação entre elas origine um determinado grau de brilho nesse ponto [18]. Assumindo que a diferença de fases das ondas que

chegam ao ponto A' do sensor têm um comportamento destrutivo, pode-se concluir que a informação captado por este ponto para a imagem se traduz no tom mais escuro (preto) [18]. O oposto também pode ser considerado, originando assim pontos mais luminosos, como se encontra representado no ponto B' (da Figura 6). Este fenómeno acontecerá em todos os pontos da imagem, originado assim um padrão de intensidade luminosa aleatório por toda a imagem [18].

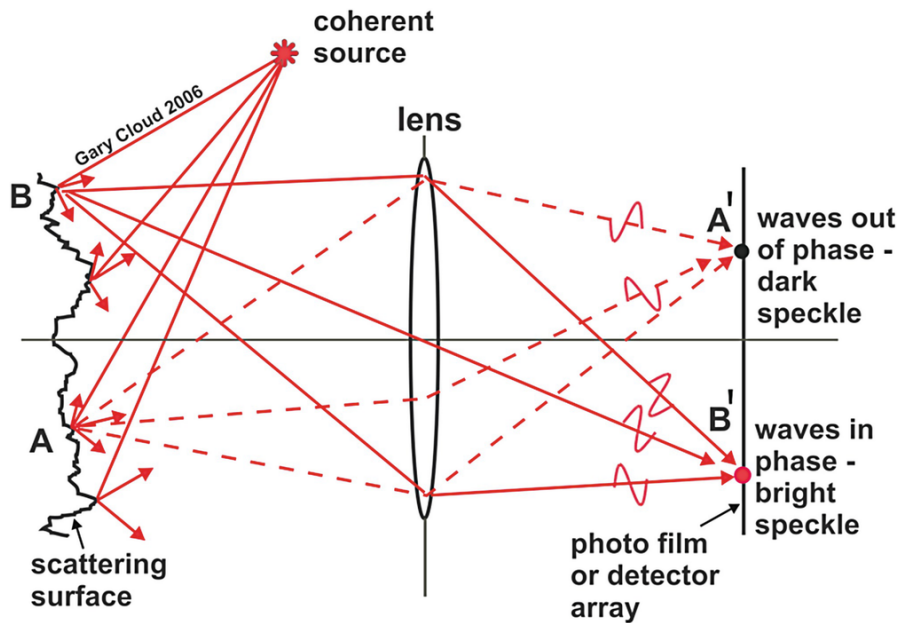


Figura 6: Processo de obtenção de formação de uma imagem de *speckle* subjetivo, através de uma lente. Consequência da interferência das ondas de luz coerente espalhadas numa superfície (retirado de [18]).

Pode visualizar-se na Figura 7 um exemplo de laser *speckle*, tendo como base um laser vermelho.



Figura 7: Exemplos de laser *speckle*, tendo como base um laser helium-neon (retirado de [20]).

2.2.2 Laser Speckle Contrast Analysis (LASCA)

De um modo geral, as técnicas de processamento do contraste para imagens de *laser speckle*, podem ser classificadas em domínios espaciais e temporais. O algoritmo utilizado para calcular o contraste de uma imagem de *laser speckle*, utiliza uma janela com um determinado tamanho, que é usada para calcular um valor de contraste, sendo este atribuído ao pixel central da janela utilizada (Equação 2). Descrevem-se a seguir alguns métodos existentes, de cálculo do contraste, em conformidade com o seu modo de implementação.

LSCI espacial

O método **sLSCI** (*spatial Laser Speckle Contrast Imaging*) recorre ao cálculo do contraste no domínio do espaço [17]. Assumindo que o tamanho de uma determinada janela para o cálculo do contraste seja 'w', em uma *frame raw* [17]. Pode ser visualizado na Figura 8 (a), o respetivo diagrama de cálculo deste método. O cálculo do contraste, realizado pelo método **sLSCI**, pode descrever-se da seguinte forma:

$$C_{(i,j,t)} = \frac{\sigma_{(i-\frac{w-1}{2}:i+\frac{w-1}{2},j-\frac{w-1}{2}:j+\frac{w-1}{2},t)}}{\langle I_{(i-\frac{w-1}{2}:i+\frac{w-1}{2},j-\frac{w-1}{2}:j+\frac{w-1}{2},t)} \rangle'} \quad (3)$$

onde o σ representa o desvio padrão da intensidade, o I simboliza a intensidade, o i e j corresponde à localização do pixel na frame (t) [17]. A janela utilizada para calcular o contraste é deslocada, sucessivamente, pela imagem completa [17]. Originado assim uma imagem com valores de contraste em que a resolução espacial é reduzida mas a resolução temporal é mantida elevada [17].

LSCI temporal

O modo como é aplicado o método **tLSCI** (*temporal Laser Speckle Contrast Imaging*) é idêntico ao modo de implementação do **sLSCI**, no entanto este conceito é aplicado no domínio temporal em vez do domínio espacial [17]. Desta forma, o contraste é determinado numa sequência de imagens sobre um único pixel, $1 \times 1 \times W$ [17]. Na Figura 8 (b), pode ser visualizado o diagrama deste método. Considerando uma janela 'w', o cálculo do contraste num pixel, $C_{(i,j,t)}$, implementando o algoritmo **tLSCI**, pode ser caracterizado da seguinte forma:

$$C_{(i,j,t)} = \frac{\sigma_{(i,j,t-\frac{w-1}{2}:t+\frac{w-1}{2})}}{\langle I_{(i,j,t-\frac{w-1}{2}:t+\frac{w-1}{2})} \rangle'} \quad (4)$$

onde σ , I , i , j , e t tem o mesmo significado que no algoritmo anterior (ou seja, a posição do pixel numa sequência de imagens *raw*) [17]. Relativamente à resolução temporal, esta diminui após a implementação deste algoritmo. O que não acontece na resolução espacial, mantendo-se esta [17]. Quando comparado com o **sLSCI**, este (o **tLSCI**) apresenta um comportamento antagónico. Deste modo, com o **tLSCI**, os efeitos originados pela presença de espalhamentos estáticos na imagem *speckle* são minimizados [17].

LSCI espaço-temporal

Como o nome sugere, esta técnica corresponde à combinação das duas técnicas anteriormente referidas (**sLSCI** e **tLSCI**). Também conhecida por *laser speckle flowgraphy* (**LSFG**) [17]. Este método utiliza *voxels* para poder calcular o contraste, $W \times W \times W$ pixéis, no domínio espaciotemporal [17]. Podendo este ser visualizado na Figura 8 (c). Sendo este caracterizado por:

$$C_{(i,j,t)} = \frac{\sigma_{(i-\frac{w-1}{2}:i+\frac{w-1}{2},j-\frac{w-1}{2}:j+\frac{w-1}{2},t-\frac{w-1}{2}:t+\frac{w-1}{2})}}{\langle I_{(i-\frac{w-1}{2}:i+\frac{w-1}{2},j-\frac{w-1}{2}:j+\frac{w-1}{2},t-\frac{w-1}{2}:t+\frac{w-1}{2})} \rangle}, \quad (5)$$

no qual, $C_{(i,j,t)}$ corresponde ao contraste num determinado pixel localizado na linha, coluna e da frame (respetivamente) [17]. É necessário uma boa relação entre a resolução espacial e a resolução temporal, para obter bons resultados com esta técnica [17]. A implementação desta técnica é comum, quando os níveis de atividade sofrem uma alteração acelerada [17].

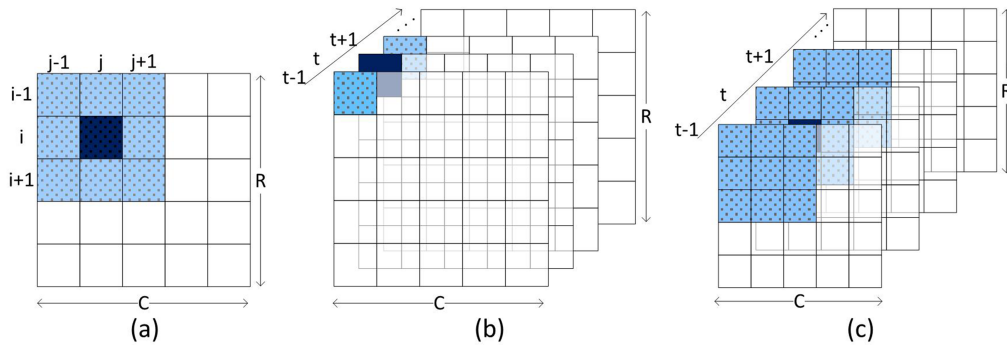


Figura 8: Diagrama de métodos estatísticos de LSCI. (a) **sLSCI**, (b) **tLSCI** e (c) **stLSCI**. O tamanho original da imagem é representado por $C \times R$ pixéis. A janela, a ciano, contribui com os valores para calcular o valor do contraste. Este valor encontra-se representado a azul (retirado de [17]).

2.3 TIPOS DE SENSORES DE IMAGEM E MODO DE FUNCIONAMENTO

Existem vários tipos de sensores que podem ser utilizados para a aquisição de informação relevante de modo a construir uma imagem virtual de uma determinada área de interesse. Neste tópico encontra-se uma breve comparação entre dois tipos de sensores possíveis a serem utilizados na aquisição da informação gerada pelo efeito de *speckle*.

O sensor do tipo CCD (*charge-coupled device*) é um detetor de fótons altamente sensível. É constituído por uma elevada quantidade de pequenas áreas sensíveis à luz, também conhecidas por pixels. O conjunto da informação presente em todas as células presentes no sensor, serve para caracterizar uma imagem de uma respetiva área (física) de interesse. Uma vez que é sensível à luz, recorre-se muito à sua utilização no âmbito da espectroscopia.

O sensor CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) é um dispositivo digital. O sensor CMOS converte a carga do pixel fotossensível para um determinado valor de tensão na respetiva localização. De seguida, o sinal é multiplexado por linha e coluna para diversos conversores digital-analógico.

Os dois tipos de dispositivos convertem a intensidade luminosa em sinais elétricos. Os dispositivos do tipo CCD são concebidos de modo a que a carga elétrica possa ser movimentada pixel a pixel para a camada *Serial Shift Register* (SSR), até que a mesma seja convertida num sinal de tensão e depois este sinal é transferido para um ADC na área dedicada à leitura do valor de tensão. Cada pixel nos dispositivos CMOS têm amplificadores dedicados para converter a carga elétrica em um valor de tensão em cada pixel, ao qual é aplicado um ganho antes deste ser convertido num sinal digital (através da utilização de um ADC). O sinal de cada pixel é selecionado através de um *multiplexer* que determina qual é o sinal que é amplificado. Na Figura 9, pode ser visualizado uma comparação entre o modo de funcionamento (que foi explicado anteriormente) de uma possível configuração de um sensor do tipo CCD e do tipo CMOS.

Grande parte das experiências realizadas no âmbito de aquisição de LSI (*Laser Speckle Image*), consiste na utilização de câmaras com sensores CCD.

Uma vez que se trata de uma tecnologia mais maturada, quando comparada com a tecnologia CMOS, tanto no desempenho como no rendimento.

Um sensor do tipo CCD oferece alta sensibilidade, mas eventualmente atinge um limite de velocidade de aquisição. Apesar da tecnologia CCD oferecer menos

ruído que a tecnologia CMOS, a nível de velocidade de aquisição (*frame rate*) esta encontra-se abaixo da tecnologia CMOS [21].

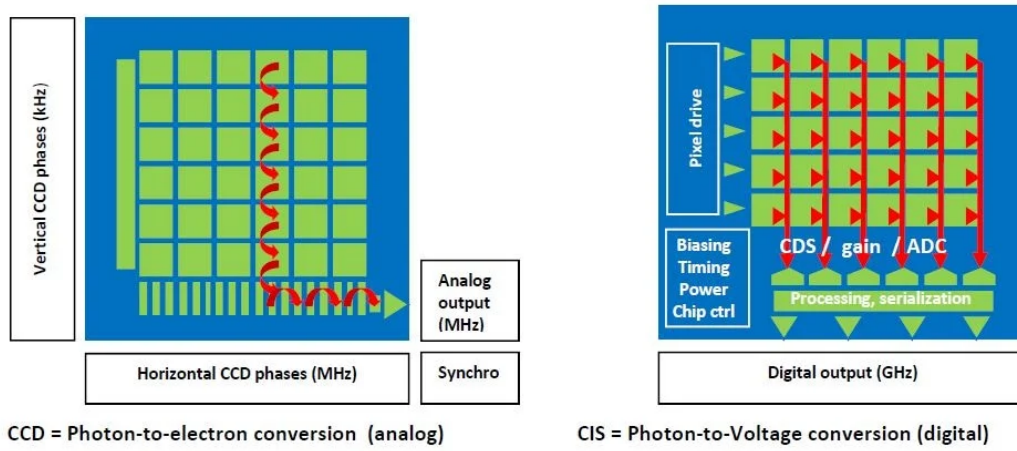


Figura 9: Conversão de fóton para eletrão (esquerda) e conversão de fóton para valor de tensão (direita) ([22]).

TRABALHO RELACIONADO

Neste capítulo são revistas algumas das aplicações de stereo *Laser Speckle*, fazendo-se referência aos setups instrumentais, aos descritores e às principais metodologias e conclusões obtidas em cada caso. Destacam-se dois exemplos de aplicações de *BioSpeckle*, no primeiro caso são utilizadas as projeções de laser *speckle* para a reconstrução 3D de partes do corpo humano [2] e no segundo caso é realizada uma comparação entre a informação recolhida pelos sensores das duas câmaras utilizadas pelo setup, através de uma análise de dissimilaridade. São ainda apresentados dois exemplos que ilustram a versatilidade e potencialidade da técnica para a discriminação tridimensional de estruturas microscópicas e também uma metodologia para geração de mapas 3D de alta densidade.

3.1 OBTENÇÃO DE REPRESENTAÇÃO 3D POR STEREO LASER SPECKLE

O sistema utilizado em [2] apresenta duas câmaras monocromáticas para aquisição da informação stereo, um laser de comprimento de onda de 635 nm, uma lente divergente e um difusor que produz um padrão de Speckle que ilumina a zona do corpo a ser caracterizada, e pode ser visto na Figura. 10.

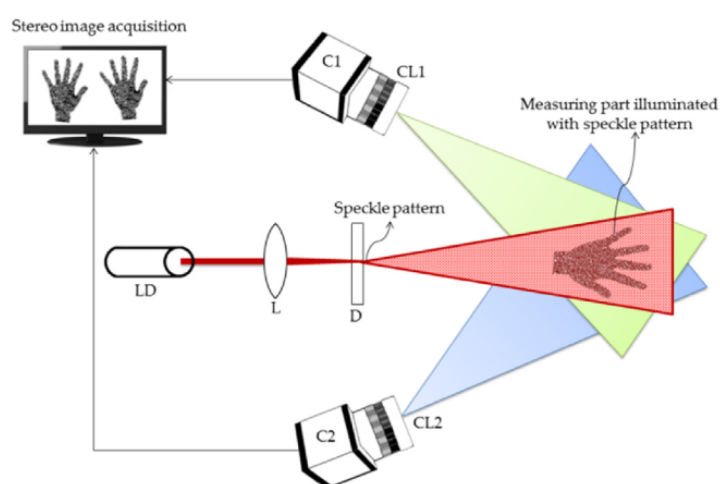


Figura 10: Sistema de aquisição para reconstrução 3D (retirado de [2]).

Após o processo de aquisição stereo efetua-se com o pré-processamento das imagens (esquerda e direita) que serão usadas como correspondência. Este processo inclui uma filtragem gaussiana com o propósito de eliminar ruído subjetivo do *speckle* [2]. Os pontos de interesse são detetados primeiro na imagem da câmara esquerda, através do algoritmo de *Shi e Tomasi*. O método de rastreamento de features descrito por *Kanade Lucas Tomasi (KLT)* é utilizado para estabelecer uma correspondência entre os pontos homólogos. De seguida, são utilizados os parâmetros intrínsecos da câmara de modo a realizar a triangulação dos pontos correspondentes. Esta triangulação, produz uma nuvem de pontos 3D usando o método de triangulação de Delaunay [2].

Na Figura 11 pode ser visualizado o resultado da reconstrução 3D de diferentes partes do corpo utilizando as nuvens de pontos obtidas na análise das imagens stereo. Para este processo existe a necessidade pré-processamento das imagens para garantir uma correspondência robusta, através da implementação da KLT aplicado o erro de *forward-backward*. Para efeitos de avaliação do desempenho do sistema, os autores deste trabalho compararam o desempenho do sistema desenvolvido com a nuvem de pontos de reconstrução 3D do sistema Kinect. Os resultados obtidos foram considerados significativos e cumprindo o objetivo.

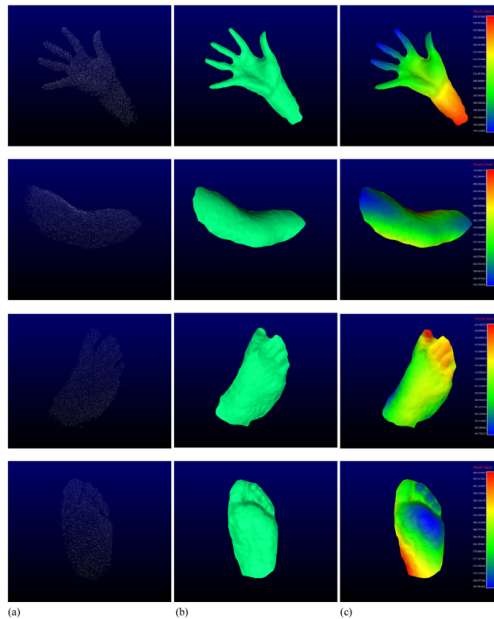


Figura 11: Resultados da reconstrução 3D da mão, do cotovelo e do pé (vista ventral e dorsal). (a) Nuvem de pontos 3D; (b) Malha 3D gerada através da nuvem de pontos; (c) Distância da câmara do sistema stereo à zona. Retirado de [2].

3.2 ANÁLISE DE DISSIMILARIDADE

Uma das questões que é central relativamente à aquisição stereo, e que está relacionada com a natureza do próprio fenómeno de geração do Speckle, é a informação que é registada em cada câmara no sentido de perceber as variações desta informação. Com o propósito de analisar eventuais variações nestes registos, são realizados estudos de dissimilaridade. Num desses estudos de dissimilaridade, em [14], foi utilizada uma técnica de bloqueio agudo da circulação sanguínea ao nível do membro superior. A configuração de aquisição (ver Figura 12) compreende uma câmara stereo (sendo esta constituída por dois sensores de aquisição, que substituem a implementação de duas câmaras físicas com ângulos e distâncias fixas entre elas), uma lente difusora e uma fonte de laser. Na Figura 13 encontra-se ilustrado o processo de identificação das ROI em ambas as câmaras

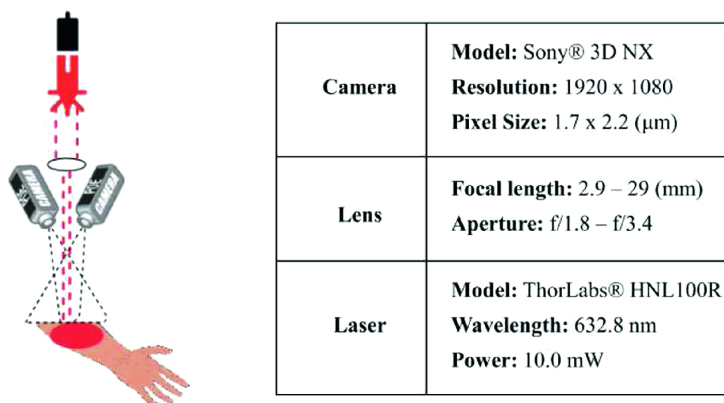


Figura 12: Sistema de aquisição *stereo* (esquerda); Parâmetros da câmara, lente difusora e laser (direita). Retirado de [14].

Este procedimento permitiu criar uma experiência de *stereo speckle* dinâmico tendo sido utilizado um processamento das sequências de vídeo através de mapas SOM (Self-Organizing Maps), um tipo de técnicas de aprendizagem não supervisionada de *Machine Learning*. Os resultados obtidos com os mapas SOM encontram-se ilustrados nas Figuras 14 e 15).

Os resultados obtidos apontam para uma influência dos parâmetros físicos (distância entre os sensores, ângulo de convergência) de aquisição sensível ao posicionamento dos sensores. Com os resultados obtidos neste trabalho obteve-se discriminação de estados fisiológicos oclusivos ou hiperémicos na experiência realizada de oclusão, ficando demonstrado que o descritor com mais potencial para obter a dissimilaridade entre vistas é a Shannon Wavelet Entropy (SWE).

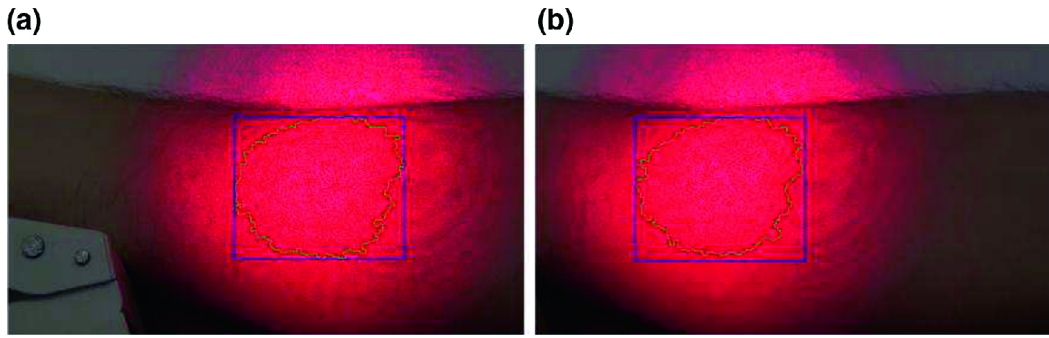


Figura 13: Exemplos de ROI para aquisição stereo (retirado de [14]).

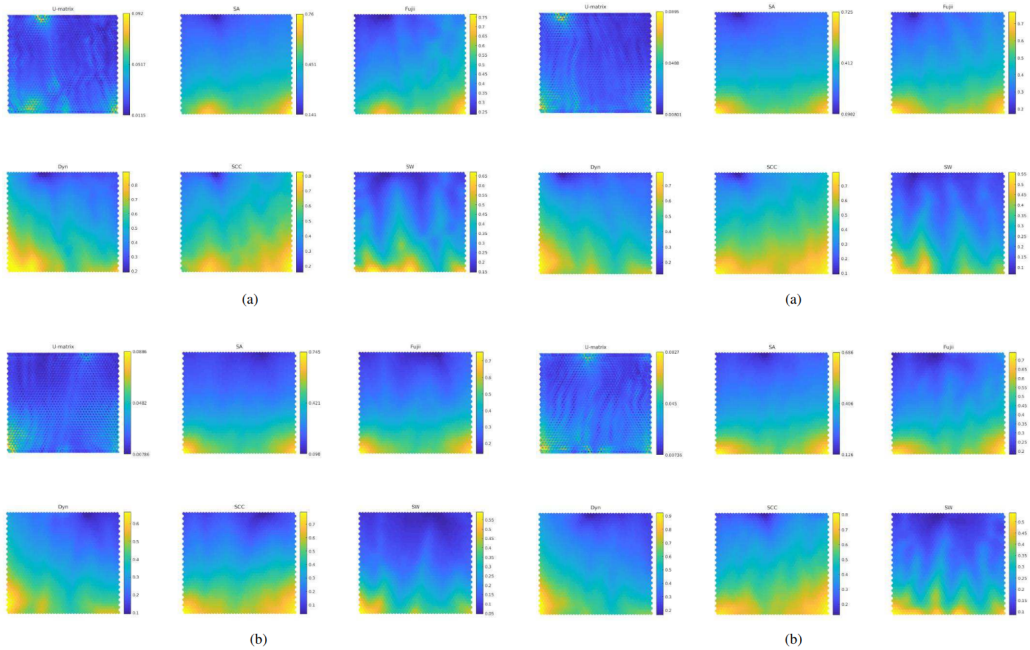


Figura 14: Mapas SOM treinados com descritores extraídos da câmara esquerda, (a) estado oclusivo, (b) estado a hiperémico. Retirado de [14].

Figura 15: Mapas SOM treinados com descritores extraídos da câmara direita, (a) estado oclusivo, (b) estado a hiperémico. Retirado de [14].

3.3 MEDIÇÃO TRIDIMENSIONAL MICROSCÓPICA

A medição tridimensional de microestruturas tem-se revelado cada vez mais importante em vários campos de estudo (em particular nas aplicações biomédicas), o que tem impulsionado o desenvolvimento de métodos de medição microscópica [23]. De modo a atingir uma precisão ao nível do *sub-pixel* ou a nível *sub-micron*, em [23] desenvolveu-se um método baseado na utilização da tecnologia *Stereo Laser Speckle*. Neste trabalho é proposto um método que combina a medição microscópica

de *stereo* telecêntrica com a projeção digital de *speckle* obtendo-se desta forma uma medição tridimensional de microestruturas [23]. Para este objetivo recorreu-se a uma configuração experimental onde se utilizaram duas câmaras telecêntricas idênticas. A configuração utilizada em [23], pode ser visualizada na Figura 16. Para projetar o padrão de *speckle* foi utilizado um módulo de projeção industrial DLP [23].

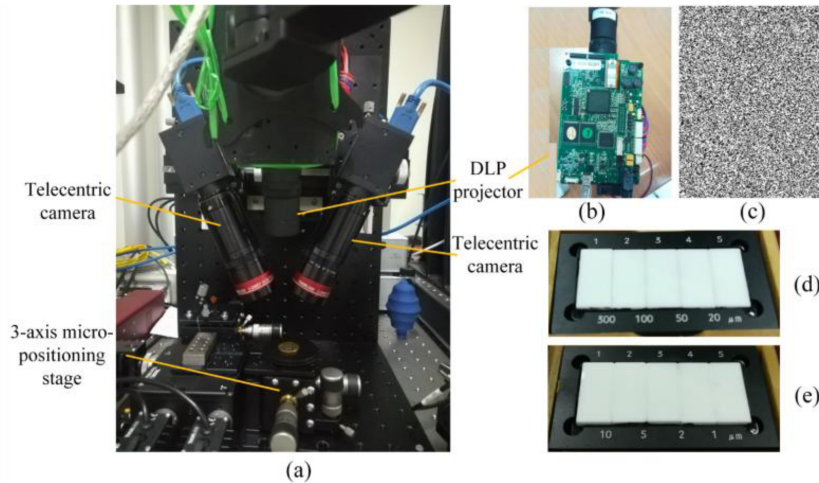


Figura 16: **a)** Configuração experimental utilizada para realizar medições 3D; **b)** Módulo de projeção (DLP); **c)** *Speckle* digital aleatório gerado pelo DLP; **d)** *Ceramic Step Master 300C* com valores nominais de *steps* de 20, 50, 100 e 300 μm ; **e)** *Ceramic Step Master 10C* com valores nominais de *steps* de 1, 2, 5 e 10 μm . Retirado de [23].

De modo a obter os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das duas câmaras, com lentes telecêntricas, foi utilizado um modelo de calibração e aplicado um algoritmo de reconstrução *stereo* binocular adequado para imagens telecêntricas [23]. Através de medição 3D de matrizes de grade e de matrizes cilíndricas, com diferentes alturas, em diferentes locais, realizaram-se testes de verificação das medidas efetuadas [23]. Um exemplo dos resultados destes testes pode ser visualizado na Figura 17. Com o intuito de validar a precisão e os resultados obtidos, foram utilizados dois *Mitutoyo step masters* [23].

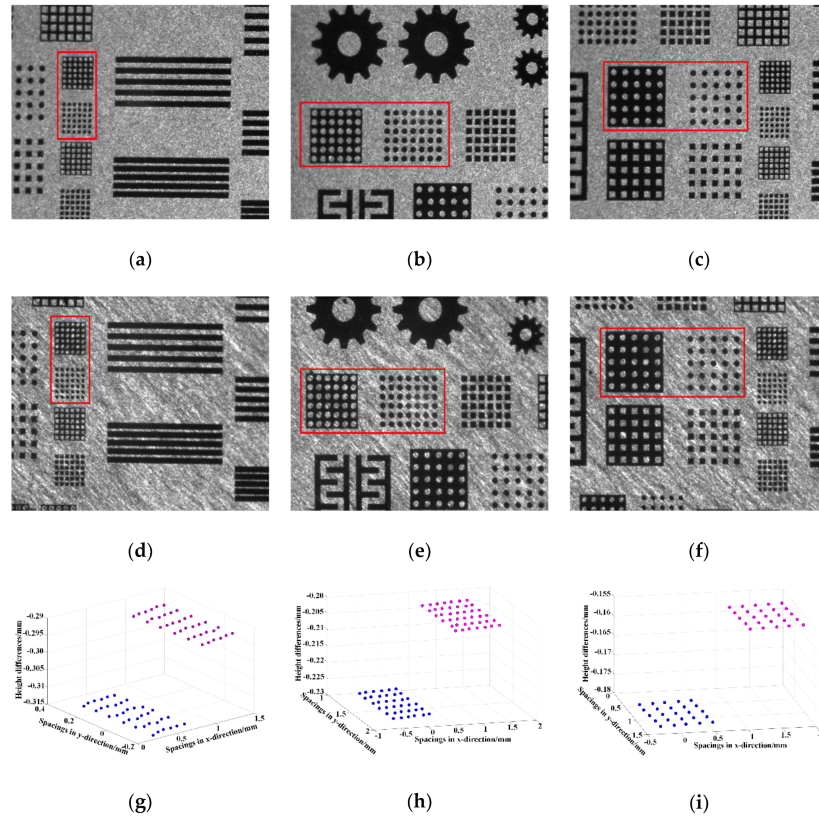


Figura 17: Assinalado a vermelho, encontra-se três conjuntos de cilindros utilizados para realizar os testes de reconstrução 3D. Imagens que correspondem à vista da esquerda (a)-(c). Imagens que correspondem à vista da direita (d)-(f). Resultados da reconstrução 3D (g)-(i). Retirado de [23].

Desta forma, com o método de processamento implementado e com o setup utilizado foi possível obter informação tridimensional, em escala milimétrica, de microestruturas a nível de *sub-pixel* e a nível *sub-micron* [23]. Na Figura 18 podem ser visualizados alguns dos resultados obtidos, na execução de análises realizadas a superfícies de nível superior e nível inferior. Na Figura 18 (a, b) está representada a distribuição do erro das nuvens de pontos no nível superior e inferior de um *Step Master* de 300 μm , enquanto que na Figura 18 (c, d) se apresentam os mesmos parâmetros para um *Step Master* de 100 μm . Apesar de o valor máximo do erro absoluto atingir o valor de 4,88 μm , a média de valores dos erros encontra-se numa escala '*sub-micron*' e o desvio padrão é cerca de 0,1%. Isto significa que o método proposto teve uma precisão, na medição, no plano '*sub-micron*' e alta fiabilidade de medição uma vez que a distribuição dos erros foi relativamente uniforme em cada nível.

3.4 DETEÇÃO DE NUVENS DE PONTOS 3D COM ALTA DENSIDADE, UTILIZANDO SISTEMA DE AJUSTE DE SPECKLE

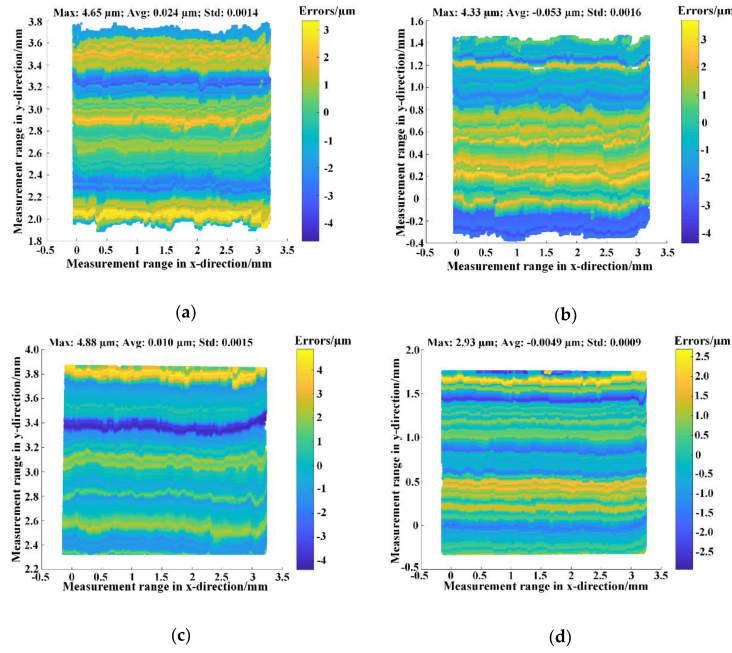


Figura 18: Exemplo da distribuição do erro de diferentes nuvens medidas. 'Max' corresponde ao erro absoluto máximo, 'Avg' corresponde ao erro médio e 'Std' corresponde ao desvio padrão. (a, b) Distribuição do erro das nuvens de pontos, no nível superior e no nível inferior, do *Step Master* de 300 μm . (c, d) Distribuição do erro das nuvens de pontos, no nível superior e no nível inferior, do *Step Master* de 100 μm . Retirado de [23].

3.4 DETEÇÃO DE NUVENS DE PONTOS 3D COM ALTA DENSIDADE, UTILIZANDO SISTEMA DE AJUSTE DE SPECKLE

A utilização do padrão de speckle em sistemas de fotogrametria tem sido também aplicado com potencial interesse, como por exemplo no trabalho apresentado em [24]. O padrão de speckle gerado pela incidência do feixe de luz coerente é afetado pela distância a que se encontra o objeto a ser caracterizado [24]. Por sua vez, o ruído também influencia o padrão de *speckle* gerado na superfície do objeto [24]. Para além destes fatores, a densidade da nuvem de pontos obtidos para a reconstrução 3D, também é um grande constrangimento.

Considerando estes aspetos foi assim proposto um sistema de deteção 3D de disparo único, tendo como base a projeção de laser speckle e um sistema de visão *stereo* com o objetivo de se obter mapas de profundidade de alta densidade através da utilização de um único padrão de *speckle* associado ao controlo da dimensão do *speckle* quando a distância ao objeto é alterada durante o processo de medição [24]. O sistema proposto neste trabalho pode ser visualizado na Figura 19.

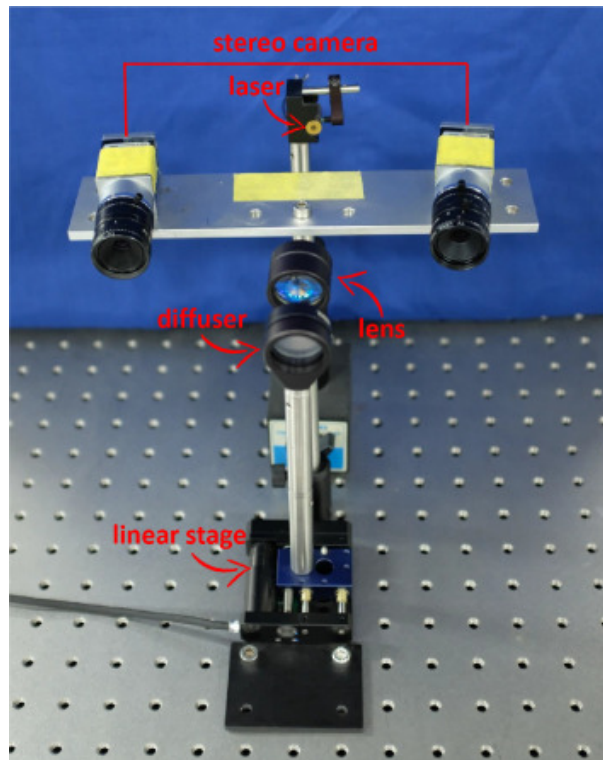


Figura 19: Exemplo de sistema *stereo* implementado em [24]. Retirado de [24].

Com o intuito de caracterizar a influência da qualidade do *speckle* na obtenção de bons mapas de disparidade, é realizada uma análise a como a distância ao objeto afeta o tamanho do *speckle* e na aquisição 3D.

Uma vez que o tamanho do grão do *speckle* afeta diretamente o resultado da nuvem de pontos obtida, um sistema que ajusta automaticamente o tamanho do *speckle* relativamente à distância em que o objeto se encontra, é considerado uma mais valia. Na Figura 20 pode visualizar-se a comparação da densidade do número de pontos obtidos através do sistema proposto em [24] (Figura 20 (c)) com os três sistemas seguintes: Kinect v1 (Figura 20 (a)), o sistema desenvolvido pelos autores anteriormente (Figura 20 (b)) e o *scanner* 3D David SLS-3 (Figura 20 (d)). A densidade dos pontos foi estimada através do cálculo do número de vizinhos com um raio de 3 mm. As zonas apresentadas a vermelho representam zonas onde a densidade de pontos é maior e a azul zonas com baixa densidade. A distribuição do número de vizinhos num raio de 3 mm e o respetivo histograma são apresentados, em gráficos, desde a Figura 20 (e) até à Figura 20 (h). Nestes gráficos também pode ser visualizado o valor médio da densidade e o desvio padrão da densidade calculados através da distribuição de Gauss. Nestes encontram-se representados no eixo horizontal o número de vizinhos e no eixo vertical o número de pontos que apresentam essa quantidade de vizinhos.

Os resultados apresentados na Figura 20, demonstram que o método de pré-processamento proposto para reduzir o ruído do *speckle* se mostrou efetivo, comprovando, também desta forma a possibilidade de realizar aquisições 3D relativamente densas. O método de pré-processamento variável resolve a diferença de brilho entre as vistas bem como a variação da distância entre o sensor da câmara e o objeto. Esta característica permite obter mapas de profundidade de todas as distâncias (testadas). Dos resultados apresentados neste trabalho foi possível concluir que a densidade dos mapas de pontos obtidos através do sistema desenvolvido pode ser melhor quando comparado com algumas tecnologias já implementadas de *scanners* 3D.

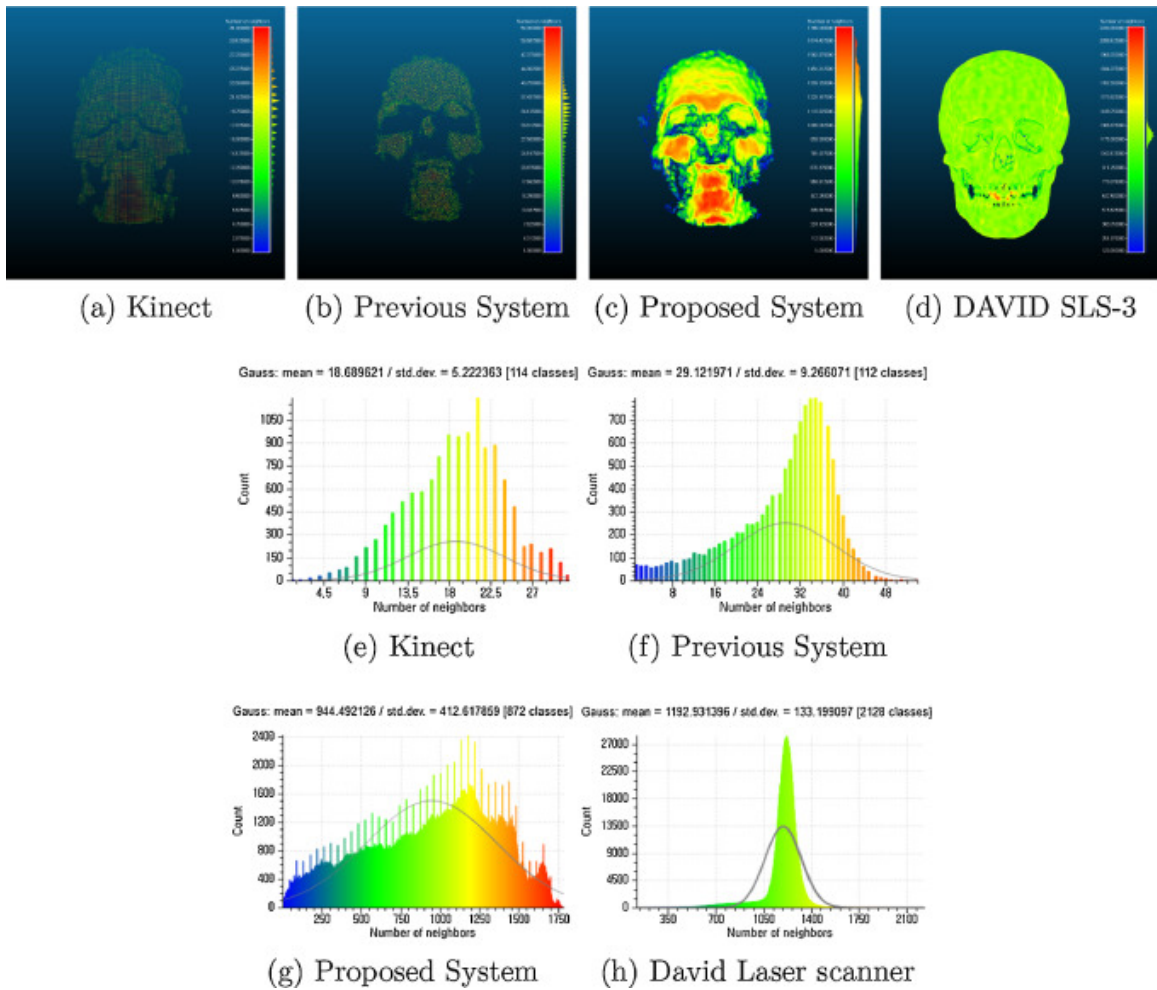


Figura 20: Confrontação da densidade (a)-(d), número de vizinho presentes num raio de 3mm e histograma da densidade (e)-(h). Retirado de [24].

METODOLOGIA

A concepção de um sistema de aquisição de imagens *stereo* é um dos objetivos deste trabalho. Uma vez que é necessário garantir a possibilidade de alteração dos diferentes parâmetros que caracterizam a aquisição de imagens *stereo* (para cumprir o outro objetivo do trabalho), tais como o ângulo de convecção, distância entre câmaras e abertura da lente da câmara (foco), o sistema deve ser bastante flexível. Também os parâmetros que possam influenciar o *speckle* gerado da incidência do feixe de luz coerente na área pretendida (distância entre a lente e o difusor) devem poder ser alterados. Outro parâmetro a considerar é o *frame rate* de aquisição, uma vez que o *speckle* é um processo imediato e dependente do objeto filmado que pode sofrer alterações constantes.

Neste capítulo encontram-se explanados os fatores que estão diretamente relacionados com este processo. Estes fatores e/ou parâmetros podem ser intrínsecos das câmaras ou do sistema que é usado para comunicar com as mesmas (o *switch*, por exemplo, que serve de elemento de ligação entre as câmaras e o computador *host*). De seguida, é apresentada a disposição física do material que foi implementada para a realização das experiências, seguindo-se o *software* desenvolvido para o controlo das câmaras. Posteriormente é apresentado o modelo de procedimentos experimentais implementado na realização das experiências de aquisição. Por fim, são abordadas as diferentes fases de processamento implementadas com as imagens adquiridas, com o intuito de validar o *setup* desenvolvido e também a análise do comportamento do *speckle* nas diferentes vistas *stereo*.

4.1 PARÂMETROS DO MATERIAL UTILIZADO

As características dos componentes eletrónicos utilizados na concepção deste *setup*, encontram-se descritas nos subtópicos deste subcapítulo, estando estas relacionadas com as câmaras utilizadas, *switch* utilizado e o gerador de sinal utilizado para originar o *frame rate* pretendido. Finalmente será descrita a interface de utilizador (*GUI*) concebida no âmbito deste trabalho, para facilitar a configuração dos parâmetros.

4.1.1 Especificações das Câmaras

Tendo em consideração o material utilizado em [2], optou-se pela utilização de duas câmaras **acA1920-25gm**. Estas câmaras são ambas do mesmo modelo e com o mesmo tipo de lente aplicado em cada uma. Uma vez que o sensor CMOS é um tipo de sensor mais sensível a mudanças de luminosidade (quando comparado com o sensor do tipo CCD), este foi outro motivo para a seleção deste modelo.

Na Tabela 1, pode-se visualizar alguns dos parâmetros das câmaras. Parâmetros esses que influenciam diretamente o processo de aquisição das imagens para posterior processamento, assim como questões de transmissão desta informação para posterior armazenamento no *host computer*.

Tabela 1: Parâmetros da câmara (adaptado de [25]).

Parâmetros	acA1920-25gm
Máxima resolução possível	1920 x 1080 pixéis
Cor	Mono
Modos de sincronização possíveis	<i>Hardware trigger</i> <i>Software trigger</i> Modo <i>free run</i>
Controlo do tempo de exposição	Através de <i>hardware trigger</i> Programável através da API da câmara
Requisito de alimentação da câmara	Através da conexão por Ethernet - Power over Ethernet (PoE) 802.3af Através de conector I/O - 12 VDC
Conectores I/O	1 ligação de entrada opto acoplador 1 ligação de saída opto acoplador

4.1.2 Parâmetros do Switch de rede

Com o intuito de poder alimentar as duas câmaras, e ao mesmo tempo permitir a transferência de informação para o computador, optou-se por utilizar o *switch* GS110TP da NETGEAR. A utilização deste *switch* é recomendada pelo fabricante das câmaras utilizadas (Basler).

Outra das características importantes deste *switch*, é o facto de permitir o controlo do tamanho das *jumbo frames*. A unidade utilizada para caracterizar o tamanho destes pacotes é MTU (*Maximum Transmission Unit*), que representa o tamanho máximo de uma unidade de dados que pode ser transportada numa única transação da camada de rede física. Basicamente, o termo *jumbo frames* representa o tamanho máximo que um pacote pode possuir de modo a que este não seja fragmentado durante o transporte entre dois dispositivos. Segundo a documentação das câmaras é

necessário que este parâmetro esteja configurado para o máximo, para que se possa atingir elevados *frame rates* e/ou a aquisição de *streams* com a máxima resolução possível (1920 x 1080 pixels).

4.2 PARÂMETROS A CONFIGURAR PARA A TRANSMISSÃO DAS IMAGENS

A sincronização das imagens é um fator importante que deve ser garantido no processo de aquisição das imagens. Tendo em consideração os modos de sincronização disponíveis pelas câmaras utilizadas, optou-se por utilizar o modo *hardware trigger*. Uma vez que se trata de um sinal externo às câmaras, possibilita um maior controlo na aquisição das imagens. Após a implementação deste tipo de controlo verificou-se que para *frame rates* elevados eram observados perda de pacotes. Mesmo com o tamanho de pacotes (*jumbo frames*) no máximo valor possível pela placa de rede utilizada (não sendo esta a indicada pelo manual de utilizador), a perda de pacotes persistia. Após uma análise mais detalhada destas questões verificou-se que os fatores com maior influencia na transmissão dos dados (ou, que podem causar perda de informação), são os seguintes:

- *AOI Width* e *AOI Height* [pixel] - tamanho da ROI;
- (*packet size*) [Bytes] - tamanho dos pacotes transmitidos pelas câmaras;
- *exposure time* [μ s] - tempo de exposição do sensor;
- *bit depth* - número de bits utilizado para representar as amostras de cor por pixel (como se trata de câmaras monocromáticas utilizou-se 8 bits/pixel);
- *bandwidth reserve* [%] - largura de banda da rede reservada para lidar com situações incomuns, por exemplo interferências EMI que interrompam o processo de transmissão de uma imagem;
- *inter-packet Delay* [ticks] - parâmetro que pode ser utilizado para diminuir a largura de banda atribuída à câmara para transmissão de dados (dados relativos às *frames*).

A alteração dos valores destes parâmetros realizou-se com a ajuda de uma ferramenta disponível pela marca, dado que algumas das fórmulas apresentadas no cálculo do máximo *frame rate* possível são aproximações. Na Figura 21, pode visualizar-se a ferramenta disponível pela marca das câmaras. Através desta aplicação foi possível identificar com mais facilidade quais seriam as melhores configurações

para atingir os objetivos pretendidos. Nesta podemos verificar a existência de três possíveis configurações para atingir diferentes *frame rates*.

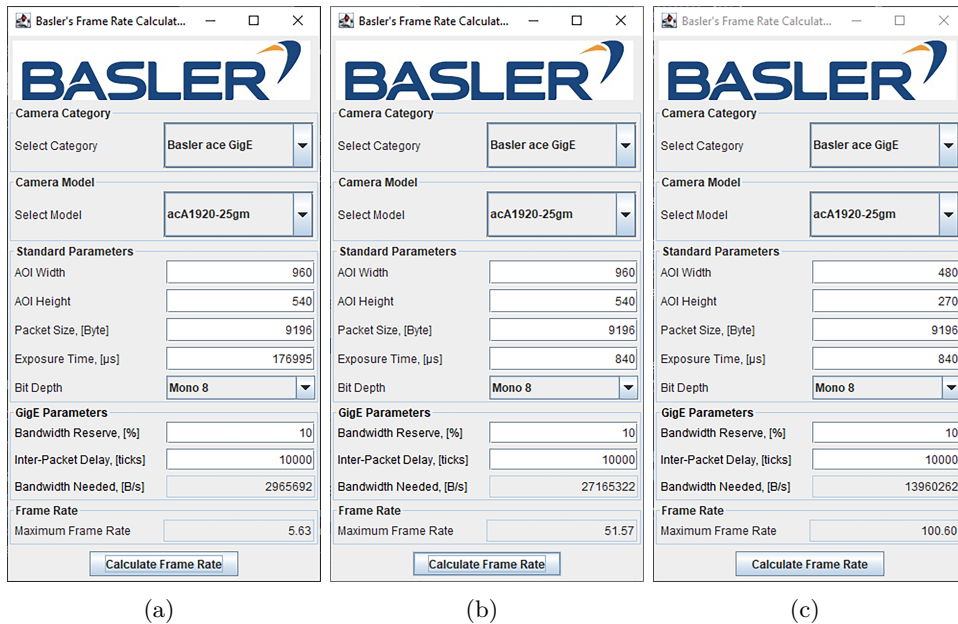


Figura 21: Ferramenta utilizada para calcular o máximo *frame rate* possível, exemplo de configuração que permite um *frame rate* máximo de 5 fps (a), exemplo de configuração que permite um *frame rate* máximo de 50 fps (b), exemplo de configuração que permite um *frame rate* máximo de 100 fps (c).

4.3 CONFIGURAÇÃO DO FRAME RATE DE AQUISIÇÃO

Como referido anteriormente, existem várias possibilidades para acionar a aquisição de cada *frame* (*hardware trigger*, *software trigger*, entre outros). Com o objetivo de garantir que o sinal de aquisição seja recebido pelas câmaras com o menor atraso possível, implementou-se um *hardware trigger*. Para isso, foi utilizado um Arduino Mega2560 para gerar um sinal de relógio com a frequência pretendida que, por sua vez, corresponde ao *frame rate* desejado.

Em outras palavras, é gerado um sinal *frame start trigger*. A aquisição dos dados visuais começará após um determinado atraso predefinido pelo modelo de câmara utilizado (sendo este parâmetro conhecido por "*Exposure Start Delay*"[μs]) e pelo modo de leitura do sensor (ou modo de disparo, conhecidos por *Global Shutter* e por *Rolling Shutter*). Este atraso é recomendado quando é utilizado um sinal de *trigger* por *hardware*. Como o modo de operação das câmaras utilizado para aquisição da informação é o *Global Reset Release Mode*, o tempo de exposição mínimo (TEM) pode ser calculado utilizando a seguinte equação.

$$TEM > (tRow * AOI_Height) + C_{TRT} \quad (6)$$

Onde:

AOI_Height = altura da ROI (*region of interest*) definida para a *frame*

$tRow$ = deslocamento (*offset*) temporal de uma linha para a próxima

C_{TRT} = constante para calcular o *total readout time* (diretamente relacionado com o *shutter mode*)

Este tempo de exposição mínimo representa o período mínimo necessário para que seja efetuada uma leitura completa de todas as linhas do sensor que correspondem a uma *frame* ou imagem. A determinação deste valor é importante para definir o comprimento da *flash window*, sendo esta determinada pela diferença entre o valor definido para o tempo de exposição e o valor mínimo de exposição calculado em (6). O sinal de *flash window* é utilizado quando se pretende utilizar uma fonte de iluminação externa de modo a melhorar a qualidade das imagens adquiridas para objetos em movimento, ou quando é necessário utilizar uma iluminação externa para outros objetivos específicos dependentes da aplicação. Uma vez que o laser *speckle* é um fenómeno onde existe uma grande variação do padrão de referência, e que resulta da incidência constante do feixe de luz na zona pretendida, este parâmetro de configuração é considerado no cálculo do tempo de exposição mínimo mas o possível sinal de *flash window* gerado não é utilizado para o controlo de qualquer tipo de iluminação externa. Dado que se pretende realizar a aquisição de uma *frame* de acordo com o sinal de relógio gerado pelo Arduino Mega2560, a câmara é configurada de modo a descartar qualquer sinal de disparo quando esta se encontra no processo de aquisição de uma *frame*. Esta configuração pode ser considerada como uma medida de segurança, porque pretende-se que não exista sobreposição durante o tempo de exposição (por exemplo, no caso de ser enviado um sinal de disparo durante o processo de leitura do sensor).

Como um dos objetivos principais é obter um processo de aquisição de imagens stereo síncrono, o processo de exposição do sensor da câmara assim como o processo de leitura da câmara deve corresponder no máximo ao período do *frame rate* desejado. Com este intuito utilizou-se o seguinte esquema temporal apresentado na Figura 22, no qual estão representados os seguintes sinais:

- 'FTWait signal': ou *Frame Trigger Wait Signal*, este sinal fica *high* quando a câmara entra no estado de "*waiting for frame start trigger*". O sinal fica a *low* quando a câmara recebe um sinal externo de *frame start trigger* (por

exemplo, um "hardware frame start trigger"; HWFSTrig) e neste momento a câmara sai do estado de "waiting for frame start trigger". O sinal volta a *high* quando a câmara entrar no estado de "waiting for frame start trigger", sendo novamente seguro enviar o próximo *frame start trigger signal*.

- 'HWFSTrig signal': representa um sinal externo de início da *frame* (sinal gerado por um circuito externo à câmara, por exemplo um sinal PWM).
- 'Exposure': representa o período de exposição do sensor da câmara (*exposure time*), iniciado após um determinado *delay* (representado no esquema por 'Exposure start delay').
- 'Frame readout': representa o período que demora a leitura da *frame* adquirida desde o sensor de imagem até ao *frame buffer*, este processo é iniciado assim que termina o tempo de exposição do sensor.
- 'Frame transmission': representa o intervalo de tempo que demora a transmitir uma *frame* adquirida, que se encontra no *buffer* da câmara, para o *host computer* através da rede.
- 'Transmission start delay': é a quantidade de tempo que demora desde que começa o processo de leitura da informação da *frame* adquirida do sensor até ao ponto em que começa a transmissão da informação, da *frame* adquirida, do *buffer* até ao *host computer*.

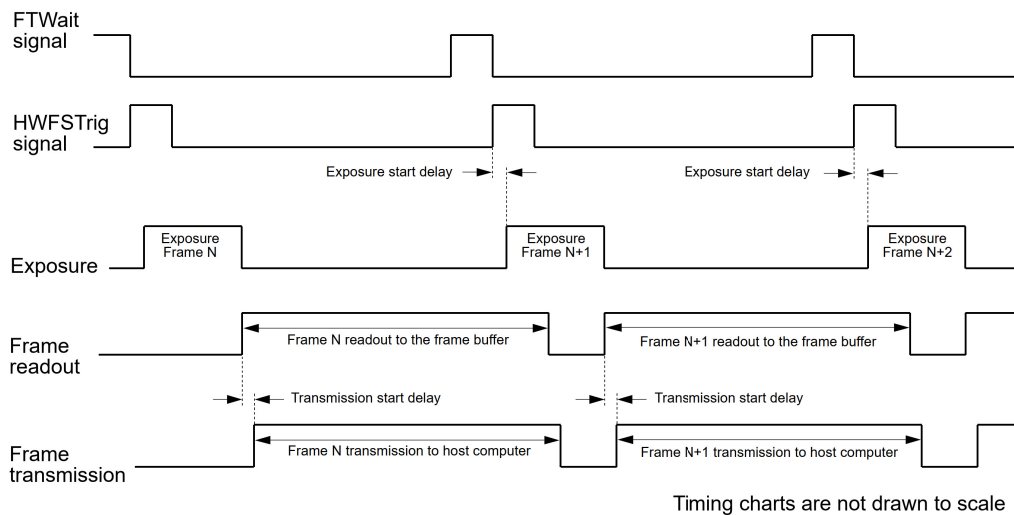


Figura 22: Gráfico temporal de uma exposição controlada através de um sinal de disparo por *hardware*, retirado de [25].

Neste esquema, pode-se constatar que é considerado o bordo ascendente do sinal de relógio para que seja iniciado o processo de exposição. É de notar que existe

um período de atraso entre o sinal de relógio e o início da exposição. Este atraso é necessário quando é utilizado um HWFSTrig (*hardware frame start trigger*), de acordo com as características da câmara utilizada. Assim que termina o período de exposição do sensor da câmara, começa o processo de leitura do sensor (ou *frame*) para o *frame buffer*. Após um determinado atraso o processo de transmissão da *frame* para o *host computer* é iniciado. O valor total de atraso utilizado nesta sequencia de processos apresentado na Figura 22, pode ser caracterizado pela equação 7.

$$\text{TSD} = \text{ESD} + \text{ILRT} + \text{DS} + \text{FSTD} \quad (7)$$

Onde:

TSD = *Total Start Delay*

ESD = *Exposure Start Delay*

ILRT = *Input Line Response time*

DS = *Debouncer Setting*

FSTD = *Frame Start Trigger Delay*

Outro aspeto a ter em consideração é o tempo de leitura da *frame* a adquirir, uma vez que o tamanho da *frame* afeta diretamente o tempo necessário para realizar a leitura completa do sensor, o que por sua vez também influencia o tempo necessário para poder transmitir esta informação para o *host computer*. Este período não pode ser inferior ao período necessário para executar a leitura completa da *frame* pretendida. Uma forma de calcular o tempo de transmissão da *frame* pode ser através da equação 8 (adaptado do manual de utilizador). Caso o valor calculado através dessa equação seja inferior ao período de leitura da *frame*, deve-se considerar que o período de transmissão terá o mesmo valor que o período de leitura.

$$\sim \text{FrameTransmissionTime} = \frac{\text{Payload Size Parameter Value}}{\text{Device Current Throughput Parameter}} \quad (8)$$

4.3.1 Modo de acionamento de leitura do sensor

As câmaras utilizadas possuem três modos de obturação o *Global Shutter*, o *Rolling Shutter Mode* e o *Global Reset Release Shutter Mode*. Estes modos servem para definir diferentes formas de iniciar o tempo de exposição de cada linha. A diferença entre estes modos de iniciação do tempo de exposição de cada linha consiste no

momento em que é iniciado e terminado o período de exposição de cada linha. No *Global Shutter Mode* o período de exposição é iniciado e terminado em simultâneo em todas as linhas, sendo adicionado, no fim de ocorrer a exposição, o tempo de leitura (t_{Row}) de cada linha anterior. No *Rolling Shutter Mode* o início da exposição de cada linha começa com um *offset* temporal que corresponde ao tempo necessário para ler a linha (*readout time*). O período de exposição em que cada linha se encontra exposta para aquisição da informação, corresponde exatamente ao período definido no parâmetro *exposure time*, quando se trata dos dois modos referidos anteriormente. No que diz respeito ao *Global Reset Release Shutter Mode* o processo de exposição já não é o mesmo. Este difere de modo a que o tempo de exposição do sensor inclua o tempo de leitura de todas as linhas anteriores da linha em que se está a efetuar a leitura. Mas a leitura de todas as linhas é iniciada ao mesmo tempo, como pode ser visualizado na Figura 23 (b).

Nesta figura (Figura 23) é feita a exemplificação de como é realizada a exposição e a leitura de cada linha do sensor da câmara nos diferentes modos de disparo (ou, modos de leitura do sensor). No eixo vertical encontra-se representado cada linha do sensor utilizado na câmara, enquanto que o eixo horizontal representa o tempo de leitura do sensor. Em cada linha, a azul, encontra-se representado quando é que ocorre o período de exposição nessa mesma linha, seguindo-se de uma barra preenchida a preto que representa o período necessário para ler a informação daquela linha. Desta forma, é possível ter uma maior perceção dos atrasos que podem influenciar o momento de iniciação do processo de exposição de cada linha, e/ou os atrasos do instante em que é iniciada a leitura da linha do sensor (estes atrasos estão sob influência direta do número de linhas que se pretende ler).

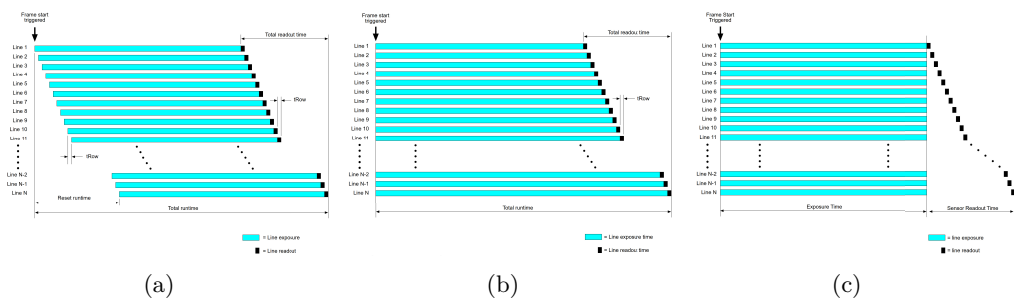


Figura 23: Gráfico temporal de (a) *Rolling Shutter Mode*, (b) *Global Reset Release Shutter Mode*, (c) *Global Shutter*, retirado de [25].

Os modos acima explanados estão disponíveis para todas as câmaras *ace* da marca Basler. Para o modelo de câmara utilizado neste *setup*, apenas pode ser utilizado o *Rolling Shutter Mode* e o *Global Reset Release Shutter Mode*. Após a análise do

funcionamento destes modos, decidiu-se que seria mais adequado utilizar o *Rolling Shutter Mode*, uma vez que este modo possibilita que o tempo de exposição de cada linha seja constante. O t_{Row} neste modelo corresponde a $35 \mu s$ (de modo a complementar esta informação ver capítulo 6.7 de [25]).

4.4 PROCESSO DE AQUISIÇÃO

Tendo em consideração todos os parâmetros relacionados com as câmaras, acima mencionados, desenvolveu-se um esquema de aquisição que se encontra representado na Figura 24.

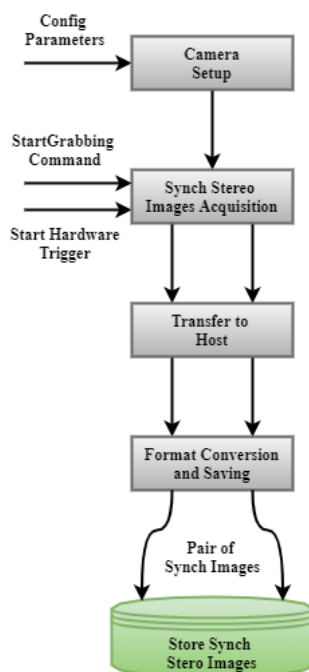


Figura 24: Diagrama do processo de aquisição.

A metodologia de aquisição é iniciada com a configuração dos respetivos parâmetros. Em seguida, pode ser executado o comando para a inicialização do processo de aquisição durante um determinado período previamente estabelecido. Posteriormente, é iniciada a geração do sinal de *trigger* para a aquisição das *frames* (ou, o sinal de ordem de captura da *frame*). O controlo do período de aquisição é realizado por meio de um temporizador, sendo este iniciado assim que é dada a ordem de começo do processo de captura. Ou seja, quando é dada a ordem de gerar o sinal de *trigger* por *hardware*.

De modo a garantir a existência de sincronização entre o par de *frames* capturado pelas duas câmaras, foi implementada uma função de validação. Esta função de

validação verifica, sempre que exista o sinal de "aquisição bem sucedida", se este sinal ocorreu na outra câmara. Desta forma, as *frames* só são armazenadas caso exista a confirmação da aquisição em ambas as câmaras, caso contrário a *frame* é descartada. Outra medida de verificação implementada, foi o armazenamento da diferença dos *timestamps* de aquisição das *frames* armazenadas. Deste modo pode-se verificar a existência de *frames* assíncronas, assim como a perda de *frames* durante o processo de *streaming*. Após a conclusão do período da realização da experiência de aquisição, o processo de armazenamento das *frames* é iniciado. As *frames* são armazenadas em ficheiros *.tiff*, onde não existe qualquer tipo de compressão. Resultando em imagens monocromáticas de 8 bit/pixel.

4.5 EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

Como já foi referido, um dos objetivos foi definido como sendo o desenvolvimento de um *setup* de aquisição de imagens *stereo* que possibilite a definição dinâmica dos parâmetros relevantes no âmbito de imagens *stereo*. Por este motivo, descreve-se a seguir a disposição do material que foi implementada e que permitiu modificar a posição relativa das câmaras. Neste sentido, foram criadas peças auxiliares para permitir um maior rigor no controlo da posição das mesmas. Por fim foi também desenvolvida uma PCB que permitiu a transmissão do sinal de controlo que proporciona a sincronização das *frames* adquiridas.

4.5.1 Suporte da câmara

Com o intuito de possibilitar o ajuste da distância entre as câmaras, assim como o ângulo entre elas, foi desenvolvido um mecanismo que possibilita o controlo do ângulo de rotação sob o eixo Z (eixo a azul representado na Figura 26).

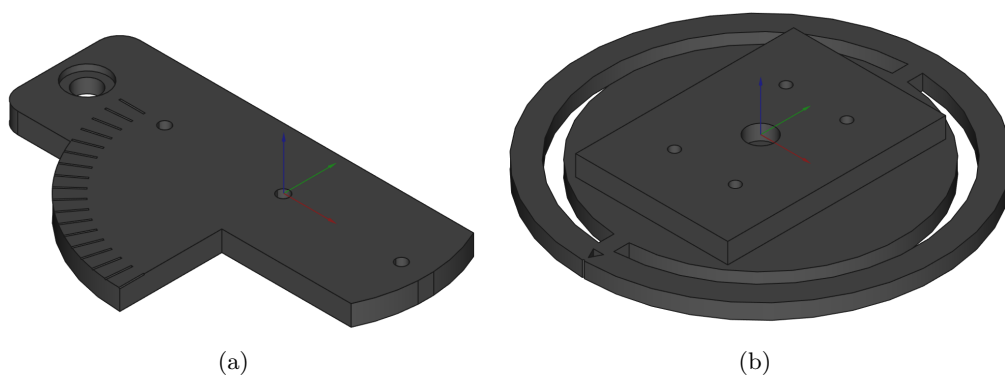


Figura 25: Suporte inferior da câmara esquerda (a), parte superior do suporte com indicador de ângulo de rotação (b), com eixos ortogonais representados.

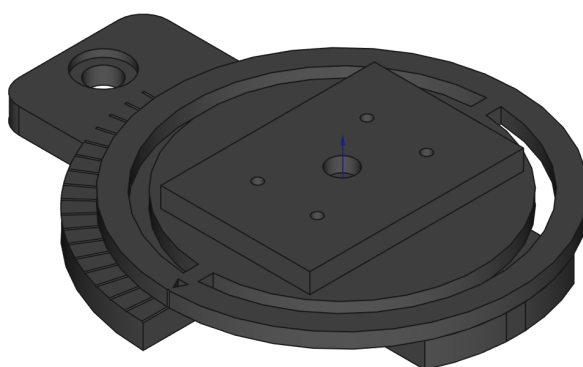


Figura 26: Suporte completo da câmara esquerda, com indicativo de ângulo e com eixos ortogonais representados.

4.5.2 Suporte do difusor e da lente

De modo a obter um feixe de luz coerente que ao incidir no objeto alvo tenha uma energia constante na área de incidência deste feixe é necessário utilizar um difusor. De modo a obter uma melhor utilização do difusor, utilizou-se uma lente para direcionar o feixe luminoso do laser para o difusor. Como a distância entre estes dois elementos poderá influenciar o feixe luminoso resultante, desenvolveu-se um suporte que permite a variação linear desta distância. Este suporte pode ser visualizado na Figura 28. Na Figura 27 (a), pode visualizar-se o corpo principal do suporte que permite a variação da distância entre a lente e o difusor. Com o objetivo de permitir a deslocação do difusor (enquanto a lente se encontra fixa), foi desenvolvido um suporte que permite a deslocação do mesmo sem que este fique desalinhado com a lente (Figura 27 (b)).

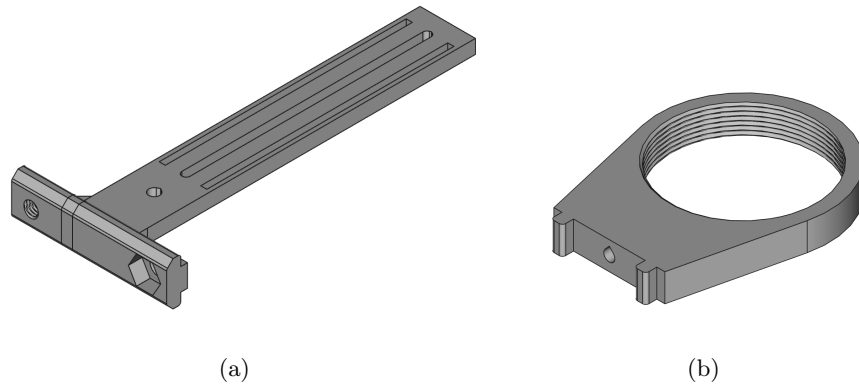


Figura 27: Suporte implementado com *rail* (a), que permite a deslocação do suporte do difusor (b).

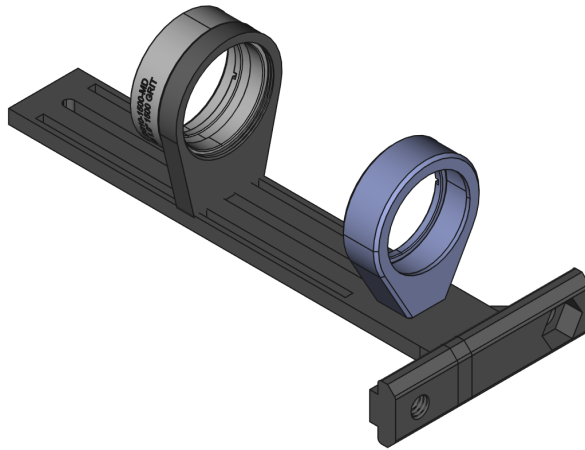


Figura 28: Exemplo de implementação do suporte desenvolvido com a aplicação da respetiva lente e difusor.

4.5.3 *Ligação do sinal de relógio*

De modo a garantir que o mesmo sinal é entregue às duas câmaras sem qualquer tipo de atraso e/ou interferência foi desenvolvida uma *board* de modo a facilitar este processo. Este circuito pode ser visualizado na Figura 29, e foi concebido de modo a possibilitar a conectividade do sinal gerado (sinal PWM) às duas câmaras, em simultâneo, ou apenas a umas delas. Na Figura 30 pode ser visualizado a PCB resultante do esquema elétrico enunciado anteriormente, representando assim as ligações físicas que permitem direcionar o sinal PWM gerado às duas câmaras também como a possibilidade de alimentar as câmaras. Como o cabo utilizado para a conexão deste sinal com as câmaras contem 6 condutores, optou-se por utilizar

fichas rj45, de modo a facilitar a conectividade entre as câmaras e o circuito, como pode ser verificado na Figura 31.

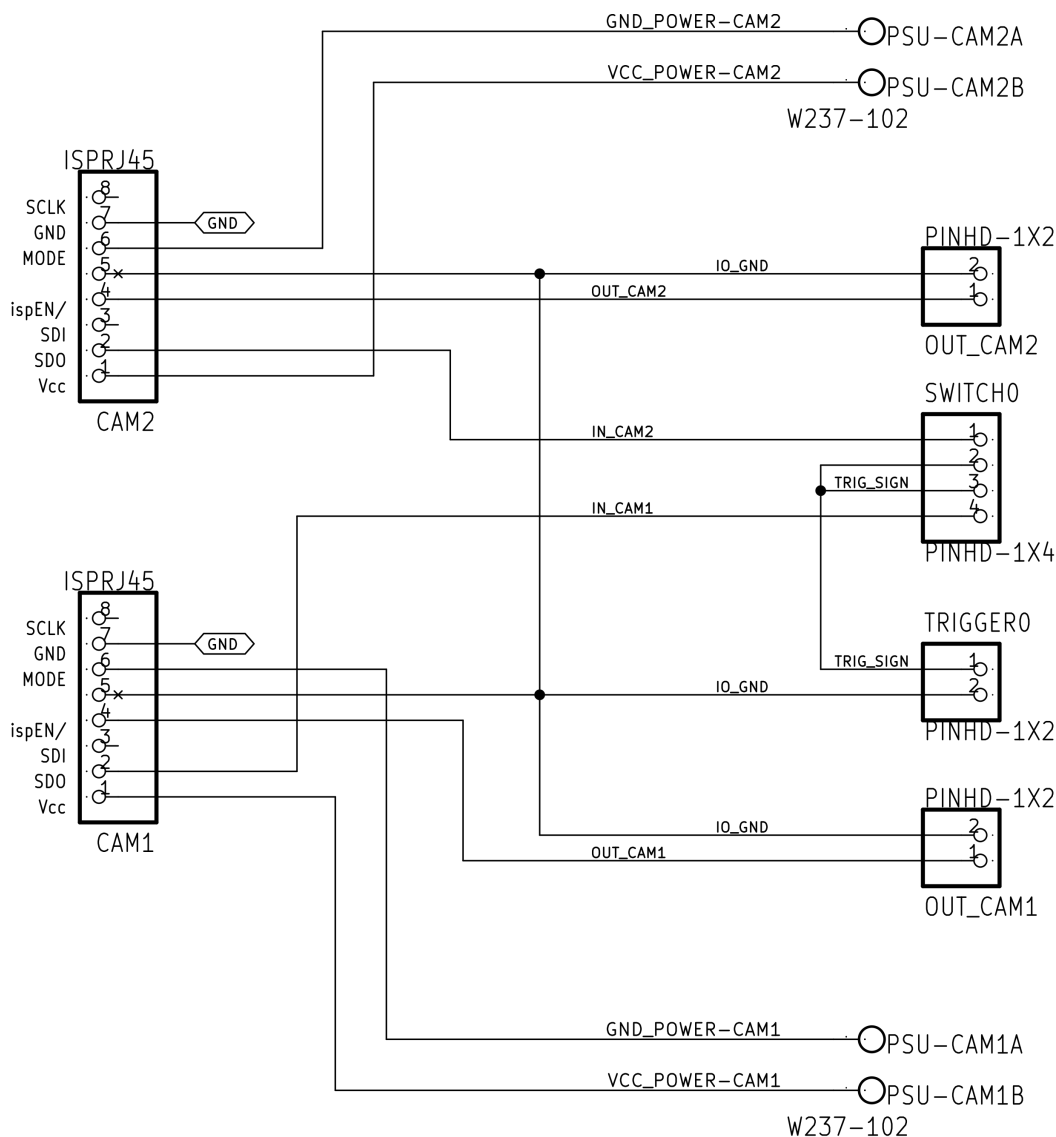


Figura 29: Esquema elétrico da PCB desenvolvida para distribuição do *hardware trigger*.

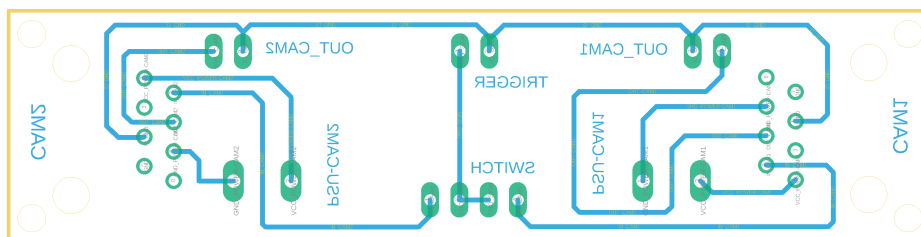


Figura 30: *Board* desenvolvida para distribuição do *hardware trigger*.

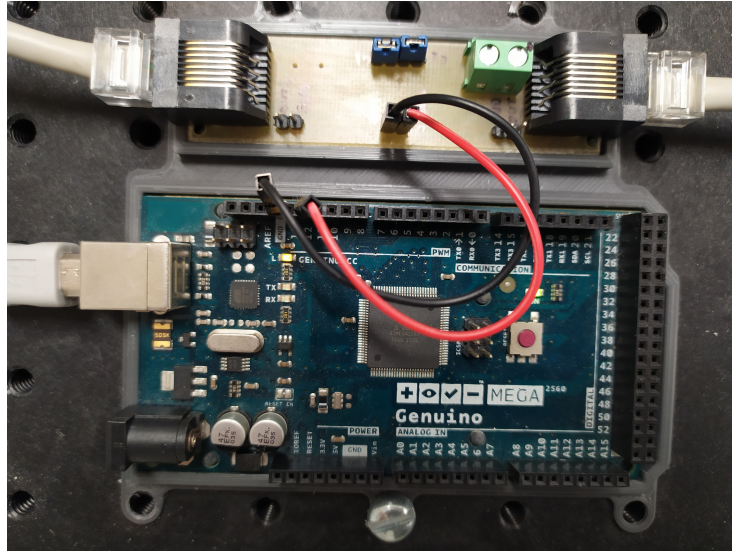


Figura 31: Exemplo de implementação da *board* desenvolvida para distribuição do *hardware trigger*.

4.6 DISPOSIÇÃO DO MATERIAL IMPLEMENTADO

Com o intuito de obter uma configuração que permita o ajuste de parâmetros que podem afetar a aquisição de informação relativamente a imagens que caracterizem o efeito de *speckle*, procedeu-se ao desenvolvimento do *setup* apresentado na Figura 32.

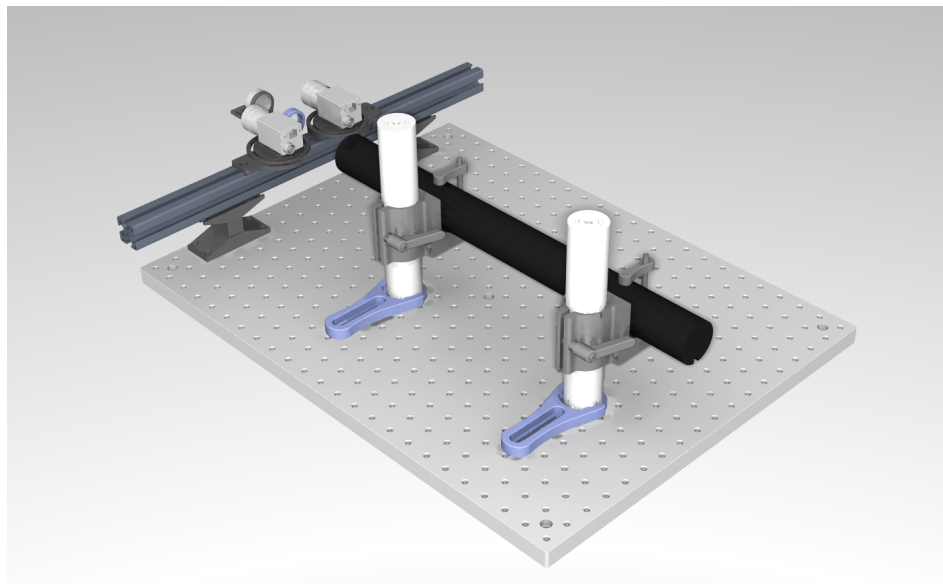


Figura 32: Disposição do material necessário para aquisição de imagens *speckle*.

Nesta Figura pode-se observar a posição do laser, aplicado sobre suportes da ThorLabs. Este deve ser colocado na posição central entre as duas câmaras. Deste modo, é possível alterar a distância entre elas sem ser necessário o reajuste da posição do laser. No que diz respeito à fixação das câmaras, foi necessário desenvolver uma estrutura que permitisse o deslocamento entre as mesmas. Por isso, optou-se pela utilização de um perfil de alumínio de 30x30mm com 500mm de comprimento. De modo a facilitar o ajuste da altura do laser (de modo a que este se encontre na horizontal, sem qualquer ângulo de inclinação), desenvolveu-se um conjunto de apoios de modo que as câmaras ficassem a uma altura fixa.

4.7 SOFTWARE DESENVOLVIDO

Com o objetivo de alterar os parâmetros das câmaras necessários para poder gerar vários modos experimentais de obtenção de imagens *Speckle*, foi necessário desenvolver uma interface gráfica (ou GUI). Para isso recorreu-se à utilização da API das câmaras desenvolvida em C++, para deste modo poder integrar a configuração dos parâmetros de acordo com o objetivo final.

De modo a facilitar o controlo dos parâmetros de configuração das câmaras, que possam influenciar o resultado das imagens de *Speckle* obtidas, desenvolveu-se a interface gráfica que se encontra representada na Figura 33. Esta interface permite o controlo dos parâmetros que influenciam diretamente o *frame rate* do *stream* adquirido, assim como a sincronização e/ou perda de pacotes (frames). Como por exemplo, tamanho da ROI adquirida, o tamanho do *packet size*, o *inter packet delay* e o *exposure time*. O período de duração da experiência de aquisição também é um parâmetro a configurar, assim como a frequência do sinal que se pretende gerar (por outras palavras, o *frame rate*). O tamanho do *buffer* interno de cada câmara (este deve ter um valor mínimo do produto do *frame rate* com o período de aquisição). Para além de permitir o controlo dos parâmetros que estão diretamente relacionados com a aquisição das imagens de *Speckle*, esta também permite a visualização das imagens quando estas estão a ser adquiridas. No Anexo A pode visualizar-se a informação que pode ser consultada quando se clica no botão '*Help*' da interface gráfica desenvolvida.

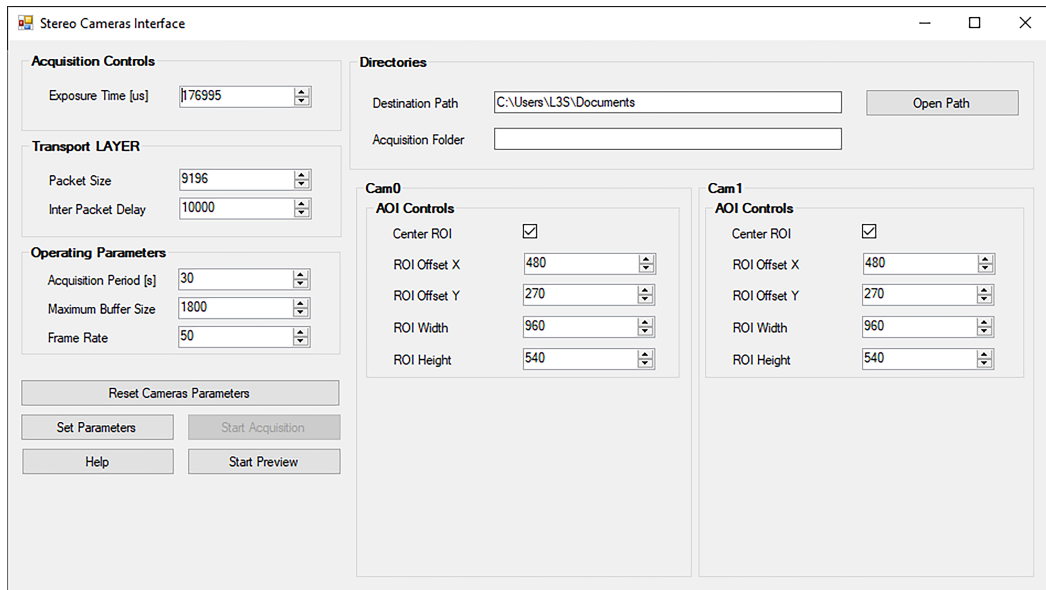


Figura 33: Aspeto gráfico da GUI desenvolvida para configurar os parâmetros das câmaras.

Como pode ser visualizado no diagrama apresentado na Figura 34, a *pylon API* oferece uma interface de programação genérica que oculta as grandes diferenças entre as seguintes tecnologias de comunicação utilizadas nas câmaras: IEEE 1394, *Gigabit Ethernet* (GigE), USB e *Camera Link*. O modo de funcionamento da GUI desenvolvida assemelha-se ao diagrama apresentado na Figura 34, uma vez que a interface gráfica desenvolvida utiliza métodos da *pylon API* relacionados com o camadas de transporte dos pacotes e de manipulação das imagens para armazenar a informação adquirida pelas câmaras. A parte gráfica da interface desenvolvida teve como base '*.NET Framework*', uma vez que se recorreu ao Microsoft Visual Studio para desenvolver os primeiros *scripts* de configuração das câmaras através da API de C++. Com o objetivo de facilitar a visualização das imagens adquiridas durante os processos de aquisição recorreu-se ao OpenCV para mostrar as imagens abaixo da secção de '*AOI Controls*' apresentada na Figura 33. Com o objetivo de facilitar a utilização da interface gráfica desenvolvida criou-se um guia do utilizador que se encontra no Anexo C. Este guia contém os passos necessários a realizar antes da utilização da interface desenvolvida, de modo a que esta possa ser executada sem problemas. No Anexo B encontram-se os passos necessários a realizar caso se pretenda preparar o sistema para utilizar as câmaras sem usufruir da interface gráfica desenvolvida.

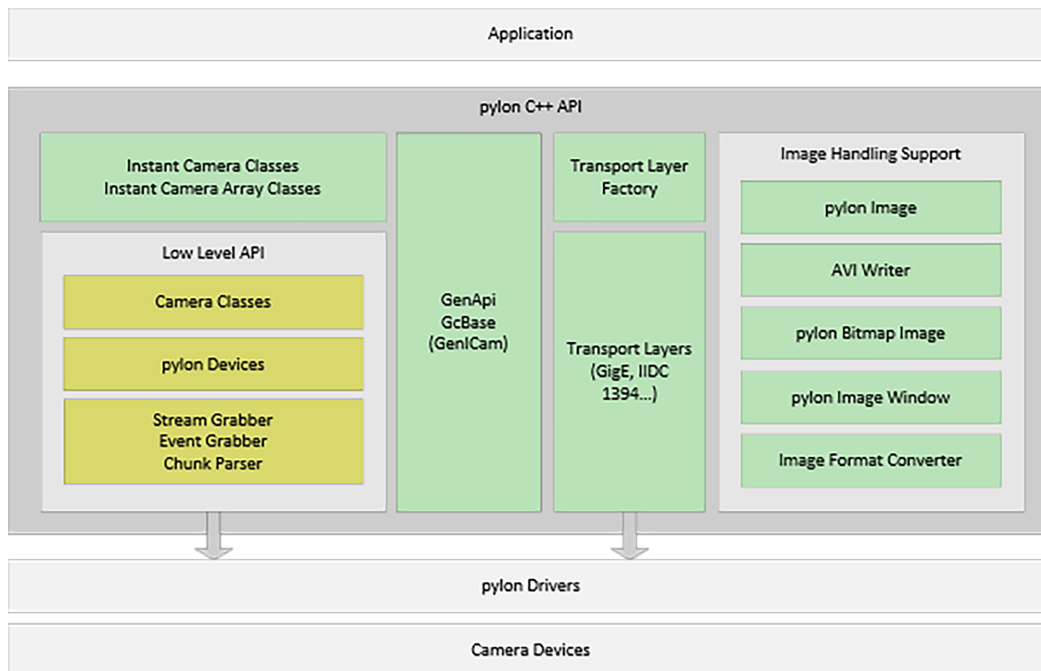


Figura 34: Diagrama de interação entre a interface desenvolvida e as câmaras (adaptado da documentação que acompanha a API utilizada).

4.8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As experiências realizadas têm como objetivo quantificar as eventuais variações no padrão de *speckle* que cada uma das câmaras registra, face à alteração dos parâmetros físicos de aquisição. Considerando este objetivo, optou-se por utilizar uma superfície estática como alvo do feixe de luz coerente, sendo esta constituída de um material rugoso compatível com o comprimento de onda do *laser* utilizado. O padrão da rugosidade presente na superfície não é regular, ou seja, a alteração dos parâmetros relativos à posição das câmaras ao objeto (ou, parâmetros espaciais do setup) podem alterar a zona da superfície que é adquirida na imagem, mas o fator mais importante é manter a superfície estática ao longo da experiência, de modo a permitir a tarefa de comparação da informação entre as diferentes vistas.

Considerando a configuração física do sistema de aquisição apresentada na Figura 32 procedeu-se à realização das experiências. Tendo em consideração os seguintes parâmetros:

- Tempo de exposição (ou *exposure time*, que influencia diretamente o *frame rate*);
- Distância entre câmaras;

- Distância entre a câmara e o alvo;
- Distância entre a lente (que direciona o feixe de luz coerente) e o difusor;
- Ângulo panorâmico de cada câmara (representado na Figura 35 por Θ_R e Θ_L).

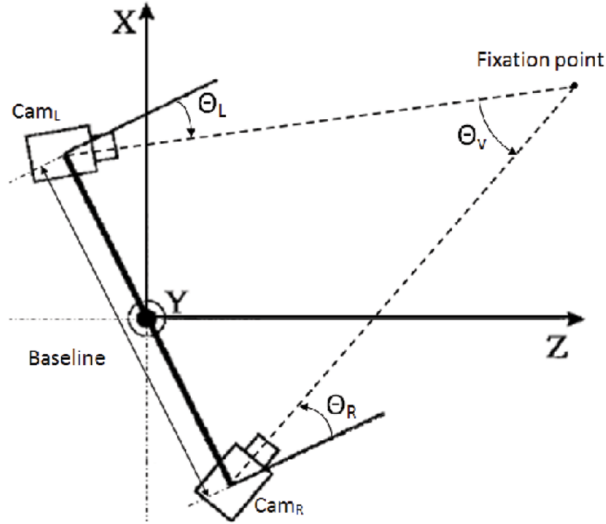


Figura 35: Representação dos ângulos da câmara direita (Θ_R) e da câmara esquerda (Θ_L), assim como a identificação do respetivo ângulo de vergência (Θ_V). Retirado de [26].

A variação destes parâmetros de aquisição são elementos caracterizadores das experiências realizadas. Com o objetivo de comparar o comportamento do padrão de *speckle* obtido em cada vista utilizaram-se dois descritores. Estes descritores traduzem-se no coeficiente de correlação e no valor de diferença absoluto, e encontram-se definidos em seguida.

Coefficiente de correlação

O coeficiente de correlação, sendo uma medida estatística, representa a intensidade da relação entre os movimentos relativos de duas variáveis (x e y). O tipo de correlação mais utilizado é o *Pearson correlation* (r). Este método mede a intensidade e a direção da relação linear entre os valores das duas variáveis.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Este pode variar entre -1.0 e 1.0 . Uma correlação positiva perfeita, acontece quando o valor do coeficiente calculado é 1.0 , demonstrando assim, que sempre que existe uma subida de valores numa variável, o mesmo acontece na outra. Quando o referido

é -1.0 , demonstra que existe uma correlação negativa entre os valores das variáveis, evidenciando que o comportamento de crescimento das variáveis é completamente oposto, ou seja, quando existe crescimento nos valores de uma variável a outra diminui. Pode considerar-se que existe correlação entre valores quando $|r| \geq 0.5$. Por fim, quando o valor do coeficiente de correlação for 0 significa que não existe relação entre os valores das variáveis analisadas, indicando a inexistência de uma relação de dependência entre os valores das variáveis.

Valor de diferença absoluta

A diferença absoluta representa a distância entre dois valores (x e y idealmente na mesma gama de valores), sendo esta calculada através da equação 10. O valor da diferença absoluta trata-se de um valor sempre positivo.

$$d = |x - y| \quad (10)$$

4.9 PROCESSAMENTO PRÉVIO DE IMAGEM

Uma vez que se pretende realizar um estudo comparativo entre vistas, usando a informação obtida por cada câmara, considerou-se que seria necessário obter a informação que normalmente é utilizada para retificar as imagens, ou por outras palavras, obter os parâmetros intrínsecos das câmaras para retificar as imagens antes de serem devidamente processadas.

Por este motivo, adotou-se um procedimento experimental específico antes do ajuste de abertura da lente de cada câmara. Este processo encontra-se representado no esquema da Figura 36. Neste caso, tendo como objetivo a aquisição de imagens com um padrão de círculos, de modo a obter os pontos de referência necessários para calcular os valores de calibração. Deste modo é possível utilizar o método `findCirclesGrid()` da biblioteca **OpenCV** para identificar as coordenadas na imagem dos círculos e posteriormente implementar o método `calibrateCamera()` e guardar os parâmetros de calibração.



Figura 36: *Pipeline* do processamento realizado às imagens de calibração para cada câmara.

As condições utilizadas para a realização dos eventos de aquisição das imagens com o intuito de obter os parâmetros de retificação das mesmas, não são iguais às que foram utilizadas nas experiências de aquisição de imagens *speckle*. Isto é, de modo a obter imagens com qualidade suficiente de modo a que se possa calcular estes parâmetros, foi necessário aumentar o tempo de exposição realizado na "experiência de calibração". Daqui resulta numa diminuição do *frame rate*, sendo este o único parâmetro (o tempo de exposição) que difere da experiência de aquisição de imagens de *laser speckle* realizadas após a aquisição das imagens para obter os parâmetros de cada câmara. No que diz respeito à abertura das lentes das câmaras, à distância entre câmaras e à distância entre a câmara e o "alvo" estes parâmetros mantêm-se iguais nas duas experiências.

Uma vez que se pretende encontrar a relação entre vistas *stereo* (ou seja, identificar a matriz transformada), foram usado os pontos que correspondem ao centro dos círculos detetados para calcular a matriz transformada. Com estes dados e recorrendo ao método **findHomography()** (da biblioteca **OpenCV**), obteve-se a relação entre as vistas, adquirindo assim, a matriz transformada da vista esquerda para a direita e vice-versa. Deste modo é possível a utilização de uma destas matrizes mais tarde durante o processamento, através do método **warpPerspective()** da mesma biblioteca.

Processamento implementado

As técnicas de processamento de imagem implementadas tiveram em consideração uma abordagem que permite caracterizar a comparação da informação de uma imagem de *speckle* entre as vistas de cada uma das câmaras. Uma das formas mais conhecidas para caracterizar a informação de uma imagem *speckle* é o cálculo do contraste desta imagem, através do *Laser Speckle Contrast Image* (LSCI). Por esse motivo, optou-se por transformar cada *frame* adquirida numa imagem [LSCI](#).

Após essa transformação, existe ainda a necessidade de comparar a informação obtida por cada vista. Para esse objetivo, optou-se por abordagem mais convencional que consiste no cálculo do fator de correlação entre imagens [LSCI](#) com o mesmo instante temporal. Deste modo obtém-se um fator que representa uma caracterização da informação global das imagens.

Por forma a obter outra medida de comparação da informação, optou-se por calcular a diferença absoluta entre imagens [LSCI](#) com o mesmo instante temporal, através do cálculo da média de janela de pixels definida em cada vista.

4.9.1 *Tratamento aplicado a cada vista*

Considerando que cada vista consiste numa perspetiva diferente do mesmo ponto no espaço, o processamento das imagens de cada vista é ligeiramente diferente. Considerando as imagens captadas pela câmara da esquerda, optou-se por realizar a sequencia de processos apresentados na Figura 37.

Nesta Figura representa-se o processo de calibração da imagem, que consiste na retificação da imagem de acordo com os parâmetros intrínsecos da câmara obtidos anteriormente. Posteriormente, realiza-se ajuste da luminosidade da imagem. Uma vez que se tratam de imagens monocromáticas e de sensores CMOS, verificou-se que este processo influenciava o resultado final, dado que, por vezes, se verificou a existência de uma diferença entre vistas, podendo esta assemelhar-se a um *offset*.

De seguida, procede-se à transformação espacial da imagem, aplicando a matriz transformada que caracteriza a transformação da vista da imagem esquerda na vista da imagem da direita, prosseguindo com o cálculo do contraste para a *frame* completa, obtendo-se assim a imagem LSCI para aquele instante temporal. Este processo é repetido para todas as imagens adquiridas numa sessão de aquisição, que correspondem à vista esquerda.

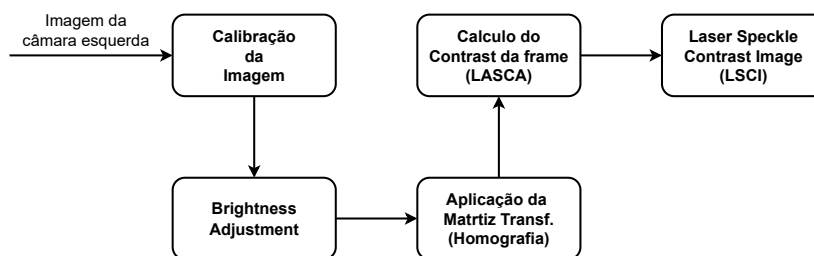


Figura 37: *Pipeline* do processamento realizado às imagens *raw* obtidas da câmara da esquerda.

A homografia refere-se a uma transformação que ocorre entre dois planos. Traduz-se num mapeamento de entre duas projeções planares da uma imagem. Normalmente, representa-se por uma matriz de transformação de 3x3 de coordenadas homogéneas [27]. Podendo esta ser caracterizado por (retirado de [27]):

$$s \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Pode ser visualizado na Figura 38, que o elemento (\mathbf{x}) representado na imagem é projetado para outra imagem com um plano de coordenadas homogéneo. Podendo assim verificar-se que a informação entre imagens se mantém, mas a perspetiva não é a mesma devido à matriz implementação transformada.

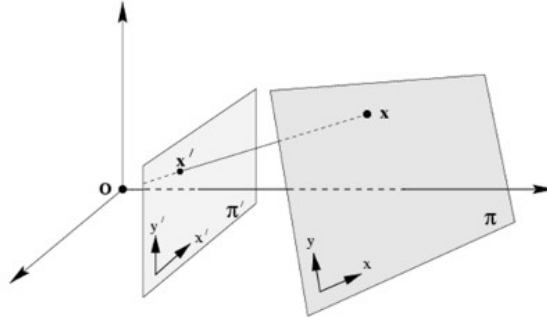


Figura 38: Transformação do plano da imagem para uma superfície plana. Retirado de [27].

No que diz respeito às imagens que correspondem à perspetiva da câmara da direita, procedeu-se um processamento muito idêntico ao realizado para a perspetiva anterior. Na Figura 39, pode-se verificar que nesta sequencia de processos o bloco de transformação não é realizado. Isto acontece devido ao facto da imagem já se encontrar na perspetiva pretendida, pois uma vez que o objetivo final é comparar ambas as perspetivas basta escolher um plano e transformar o outro. Deste modo pode-se garantir que a comparação espacial é efetuada.

Como o objetivo desta etapa de processamento é obter imagens LSCI de ambas as perspetivas (ou vistas), a sequência de processos é muito semelhante. Aplica-se o processo de calibração com os parâmetros obtidos da respetiva câmara (podendo estes variar dos parâmetros utilizados anteriormente). Da mesma forma, o ajuste de luminosidade é aplicado, tendo como objetivo minimizar a diferença de luminosidade entre as imagens das diferentes vistas. Por fim, o cálculo do LASCA é realizado com os parâmetros utilizados anteriormente, de modo que a grandeza de valores do contraste espacial calculado nestas *frames* seja idêntico ao calculado anteriormente.



Figura 39: *Pipeline* do processamento realizado às imagens *raw* obtidas da câmara da direita.

4.9.2 Análise das frames correspondentes a cada vista

Com o objetivo de comparar o contraste do *speckle* obtido entre vistas, optou-se por utilizar o cálculo do fator de correlação entre as imagens das diferentes vistas. Deste modo, optou-se por implementar a função **corr2()** (recorrendo ao MatLab) nas imagens **LSCI** obtidas.

Esta função calcula o coeficiente de correlação (r) entre duas imagens, permitindo assim a construção de um gráfico temporal, que caracterize a evolução do fator de correlação entre as imagens de cada vista. Pode ser visualizado, na Figura 40, a sequência de processos realizados para chegar ao gráfico que caracteriza o factor de correlação ao longo do tempo da experiência de aquisição.

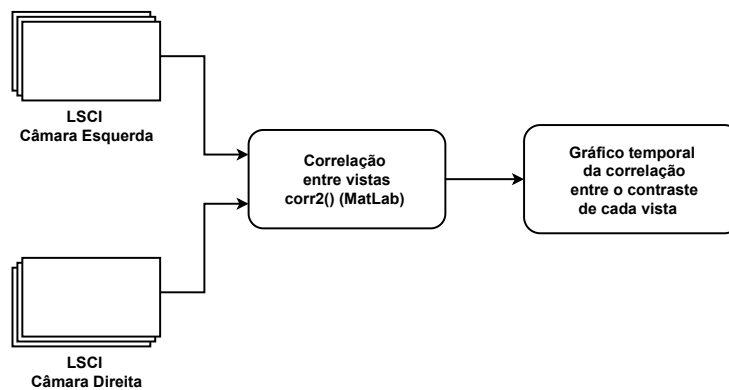


Figura 40: *Pipeline* do processamento realizado às imagens de contraste (**LSCI**) obtidas de cada vista de modo a obter a caracterização do fator de correlação ao longo do tempo da experiência de aquisição.

4.9.3 Análise de zonas correspondentes entre as frames de cada vista

A fim de realizar a comparação numa região da imagem mais restrita, optou-se por considerar uma abordagem diferente da anterior. Recorrendo às mesmas imagens, foi utilizada a função **imabsdiff()** da ferramenta MatLab para determinar a diferença existente entre as imagens das diferentes vistas. Posteriormente, procedeu-se à seleção de uma janela espacial (podendo esta ser de 3x3, 5x5, 7x7), de modo a que de seguida fosse calculado a média dos valores desta janela. Deste modo é possível realizar a um gráfico para um determinado período, onde é possível ver a evolução da diferença entre estas zonas ao longo do tempo. Na Figura 41, é possível visualizar a *pipeline* implementada.

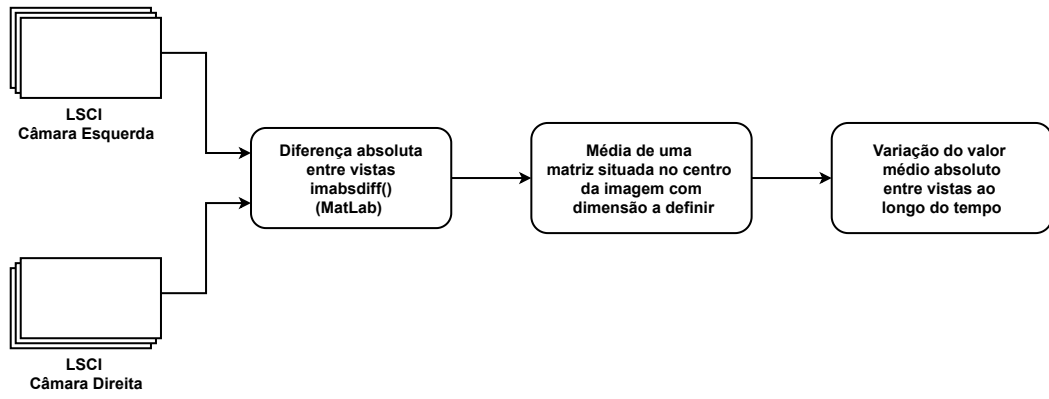


Figura 41: *Pipeline* do processamento realizado às imagens de contraste (LSCI) obtidas de cada vista de modo a obter a caracterização do valor médio da diferença absoluta dos valores de contraste, numa janela definida, ao longo do tempo da experiência de aquisição.

RESULTADOS

No presente capítulo apresentam-se os resultados obtidos, assim como a sua análise. Em particular é inicialmente verificada a pertinência do pré-processamento relativa ao processo de homografia. Numa segunda parte é realizada a análise dos parâmetros físicos do *setup*, tal como já apresentado anteriormente.

Leitura da legenda dos gráficos

De modo a melhor compreender os gráficos que em seguida se apresentam na Figura 42 apresenta-se a seguir um exemplo das legendas utilizadas nos gráficos. Como se pode constatar, o espaçamento existente em cada linha serve para separar os diversos parâmetros utilizadas na realização de uma experiência. Onde:

- 'Grab': representa que se trata de uma experiência de aquisição;
- 'ET': representa o *exposure time*, seguido do valor utilizado para o tempo de exposição [μ s];
- 'DC': representa distância entre câmaras, seguido do valor da distância em [cm];
- 'D': representa a distância entre a face do objeto e a lente da câmara em [cm], seguido do valor correspondente;
- 'A': representa o ângulo panorâmico da câmara em [$^{\circ}$], seguido do valor correspondente;
- 'F': representa o f/# da lente de ambas as câmaras, seguido do valor correspondente;
- 'DL': representa a distância entre a lente utilizada para direcionar o feixe de luz coerente e o difusor em [cm], seguido do valor correspondente;
- 'GRR': representa o modo de disparo utilizado durante a aquisição (neste caso, *Global Reset Release*).

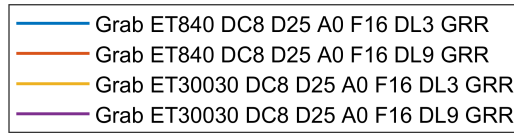


Figura 42: Exemplo de legenda implementada nos gráficos.

5.1 ANÁLISE DA RELEVÂNCIA DE PRÉ-PROCESSAMENTO

De modo a averiguar a influência da implementação da homografia no processamento das imagens obtidas, optou-se por realizar sequências de processamento com e sem a aplicação deste método, com o objetivo de realizar uma comparação dos resultados obtidos. Deste modo recorreu-se aos dois descritores já enunciados (o fator de correlação e a média de uma janela da diferença absoluta entre as duas perspetivas de imagens [LSCI](#)).

Como pode ser visualizado na Figura 43 e na Figura 44, as linhas presentes em ambos os gráficos apresentam um comportamento muito similar. Para além disso, é de notar que os valores presentes nas escalas aparentam ser os mesmos. Desta forma, à primeira instancia, sugere-se que o comportamento do padrão de *speckle* é independente da implementação da retificação e da homografia.

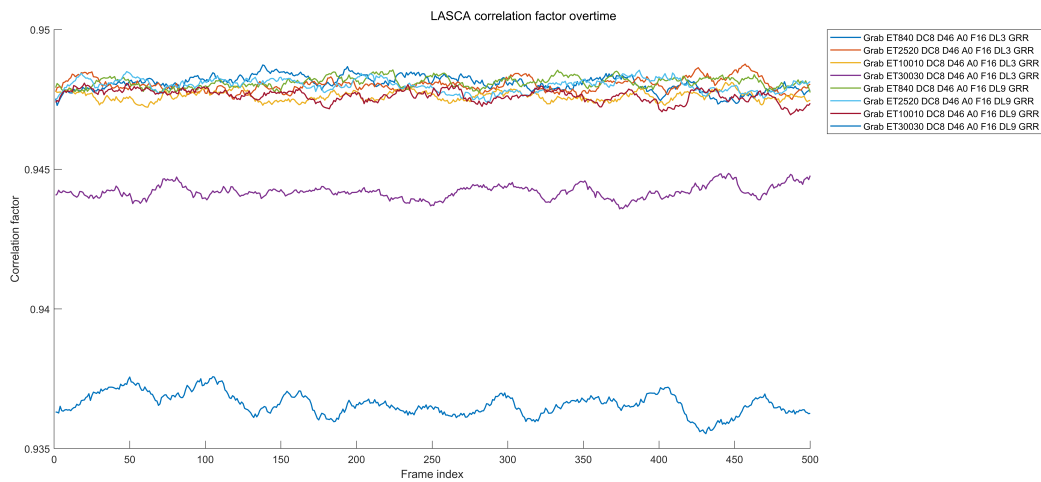


Figura 43: Factor de correlação entre *frames* [LSCI](#) com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de imagens retificadas.

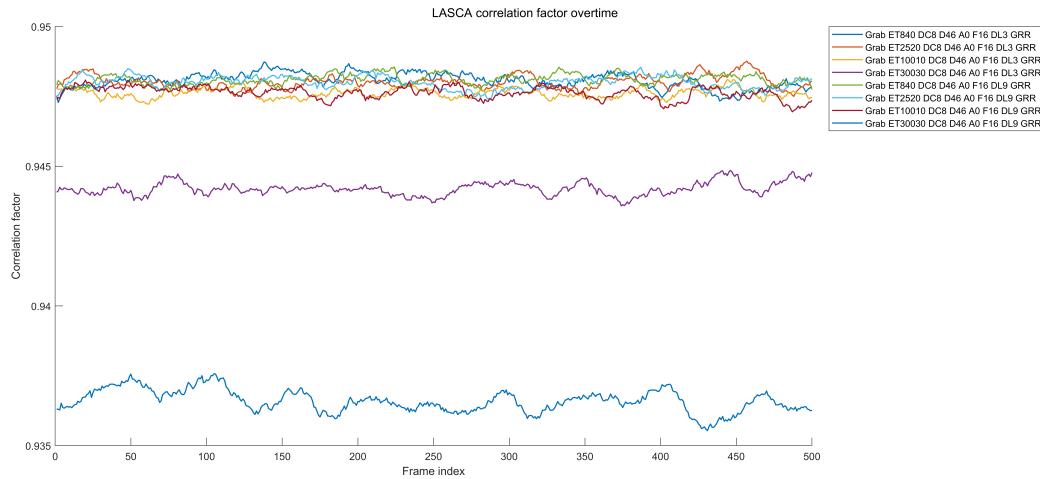


Figura 44: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de imagens não retificadas.

De modo a obter resultados mais legíveis, na Figura 45 e na Figura 46, são apresentados resultados para dois valores de 'ET' e um de 'DL'. Ao comparar estes dois gráficos, que correspondem ao comportamento do fator de correlação, podemos concluir que o comportamento das curvas é o mesmo, assim como a gama de variação dos valores que estas apresentam. De modo a validar a conclusão relativa à independência da retificação e homografia, na Figura 47 é apresentada a diferença entre os valores que se mostram na Figura 45 e na Figura 46.

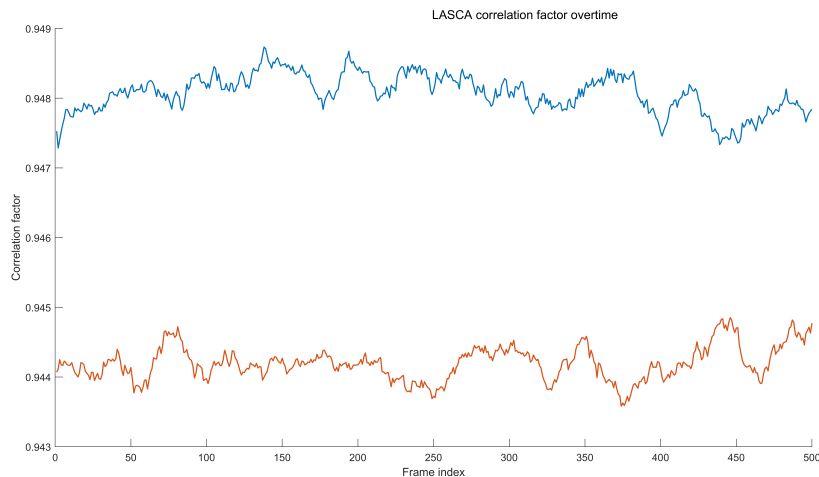


Figura 45: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de imagens retificadas.

RESULTADOS

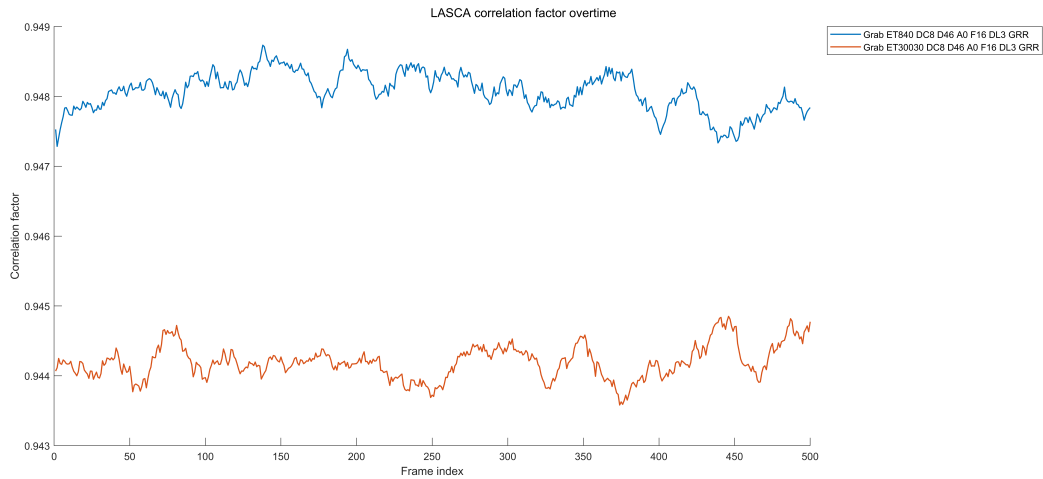


Figura 46: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de imagens não retificadas.

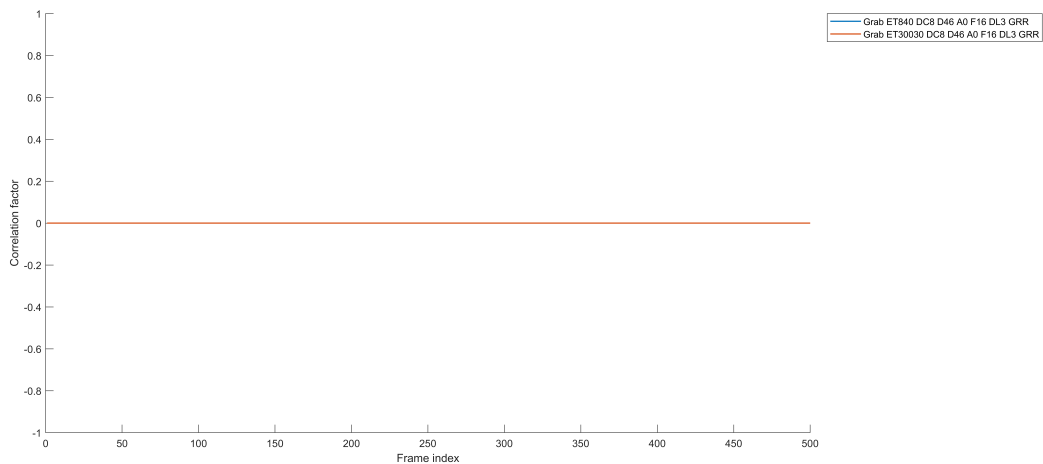


Figura 47: Diferença dos valores, das imagens retificadas e não retificadas através da implementação da homografia, do factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL' (diferença entre os valores dos gráficos apresentados na Figura 45 e da Figura 46).

No que diz respeito à análise do comportamento do valor absoluto a diferença, para as mesmas condições experimentais, pode ser visualizado na Figura 48 e na Figura 49 as curvas que traduzem o comportamento da diferença entre as vistas.

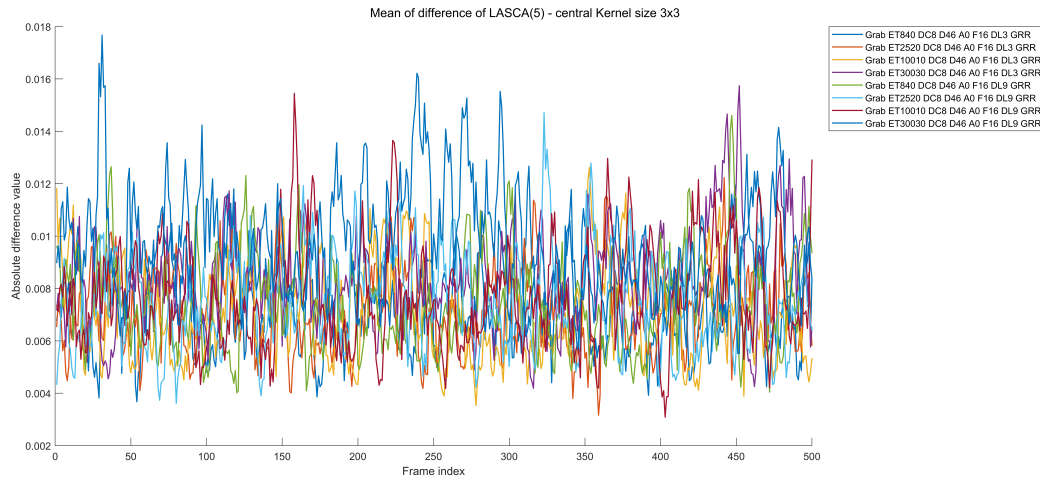


Figura 48: Média do valor de diferença absoluta, de uma janela de 3x3, entre *frames LSCI* com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de imagens retificadas.

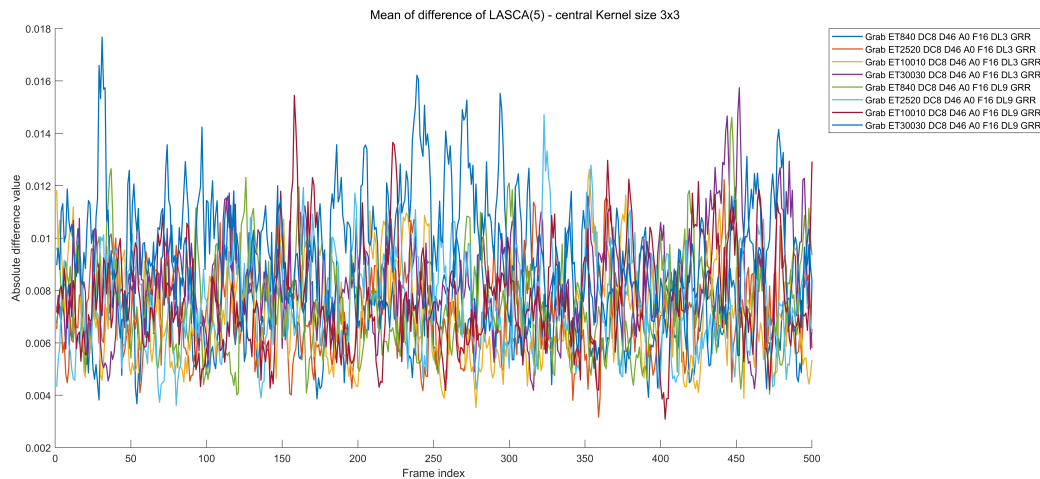


Figura 49: Média do valor de diferença absoluta, de uma janela de 3x3, entre *frames LSCI* com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos, sendo este resultado do processamento de imagens não retificadas.

De modo a obter uma visualização mais concreta dos resultados, optou-se por isolar apenas dois tempos de exposição e fixar a distância entre a lente que direciona o feixe de luz coerente e o difusor. Assim é possível visualizar na Figura 50 o comportamento do parâmetro analisado (ou seja, o valor médio da janela central do resultado da diferença entre as *LSCI*) é idêntico ao apresentado na Figura 51, não ignorando o facto de a escala de valores ser a mesma. Com o intuito de justificar esta afirmação é apresentado na Figura 52 a diferença entre os valores apresentados na Figura 50 e na Figura 51.

RESULTADOS

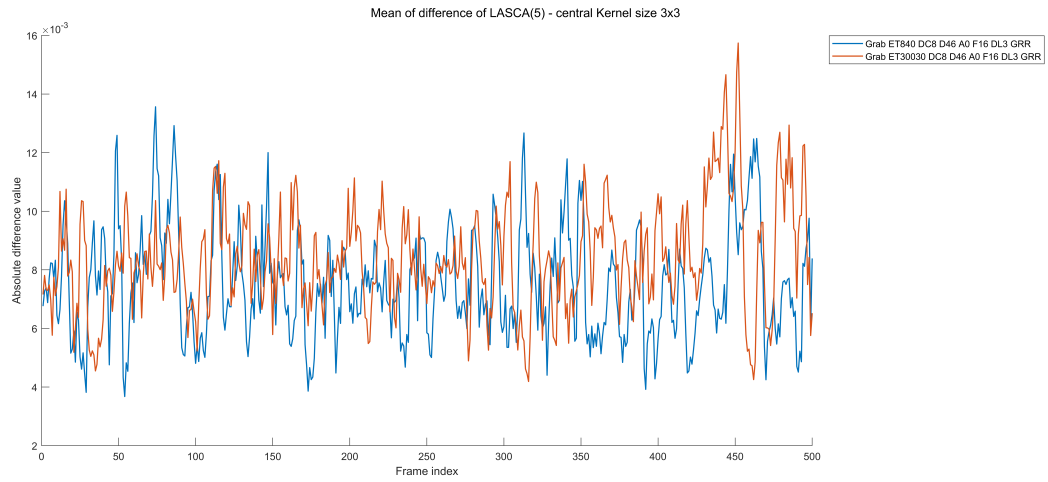


Figura 50: Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de imagens retificadas.

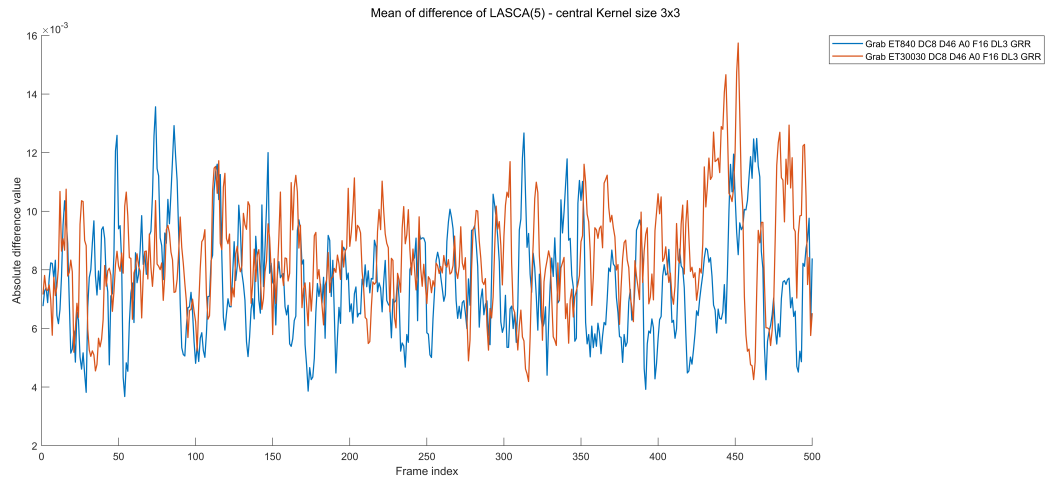


Figura 51: Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL', sendo este resultado do processamento de imagens não retificadas.

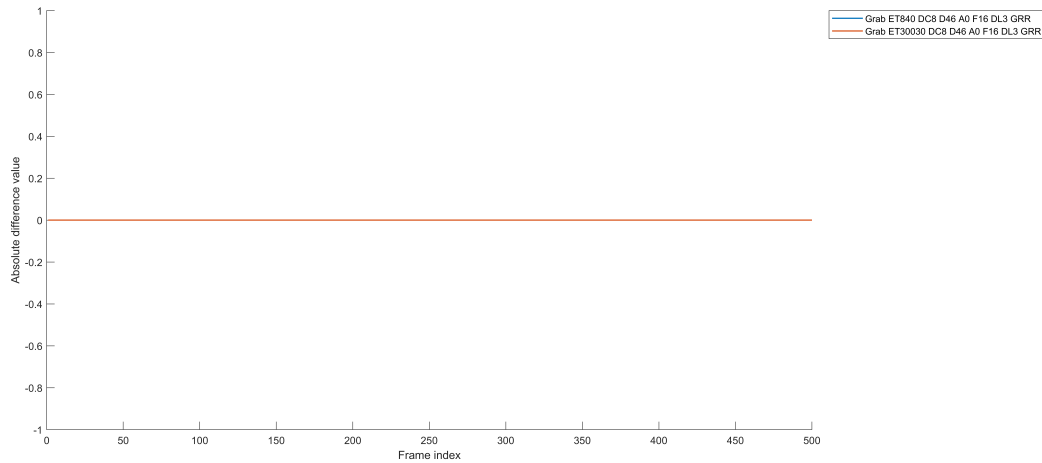


Figura 52: Diferença dos valores, das imagens retificadas e não retificadas através da implementação da homografia, da média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de tempos de exposição e para o mesmo valor de 'DL' (diferença entre os valores dos gráficos apresentados na Figura 50 e da Figura 49).

Assim, de forma resumida é possível concluir que a implementação da calibração e da transformação entre imagens não interfere com os resultados obtidos utilizando a metodologia implementada (ou seja, considerando o *setup* implementado assim como a sequencia de ações implementadas para obter os resultados pretendidos). Desta forma, de modo a facilitar o processamento das imagens, não será implementada esta etapa no processamento das imagens nos restantes resultados.

5.2 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE A LENTE QUE DIRECIONA O FEIXE DE LUZ COERENTE E O DIFUSOR

Com o objetivo de perceber se existe influencia no padrão de *speckle* para valores diferentes da distância entre a lente que direciona o feixe de luz coerente e o difusor, optou-se por variar os valores desta distância. Desta forma utilizou-se uma distância de 3cm e de 9cm, em simultâneo com a fixação da maioria dos outros parâmetros. Os resultados, para as métricas anteriormente descritas estão apresentadas na Figura 53 e na Figura 54. Nas mesmas, pode verificar-se que foram utilizados dois valores para o tempo de exposição. Desta forma pode verificar-se a diferença da variação dos valores dos resultados para um valor baixo de tempo de exposição e um valor de tempo de exposição mais elevado.

Na Figura 53, pode verificar-se que o aumento da distância entre a lente que direciona o feixe de luz coerente e o difusor faz com que a correlação entre vistas das

LSCI diminua. Isto acontece para os dois valores de *exposure time*, mas no caso de valores mais elevados pode-se verificar que isto não acontece para todas as imagens.

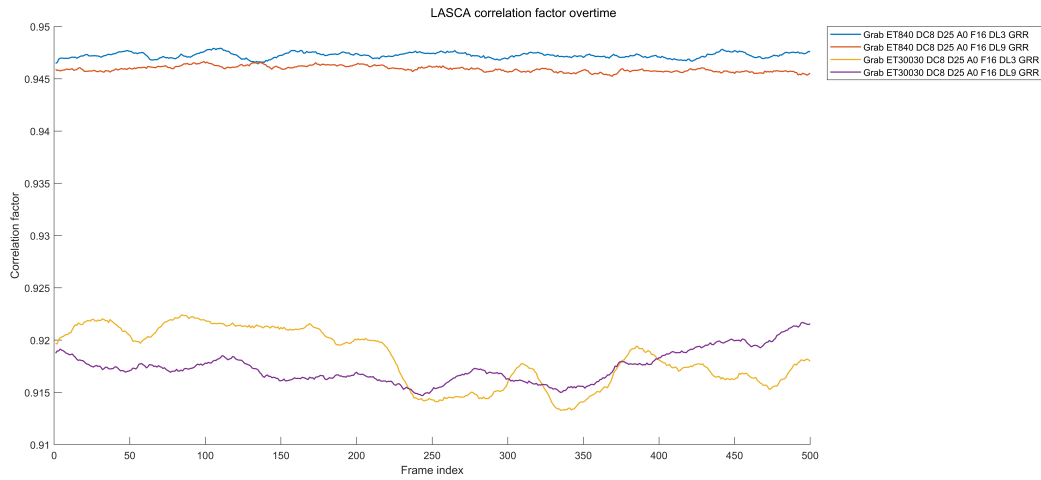


Figura 53: Factor de correlação entre *frames LSCI* com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos.

No caso da diferença de valores das **LSCI** a discrepância entre as linhas é mais acentuada para tempos de exposição mais elevado, como pode ser verificado na Figura 54. Na Figura 54 pode visualizar-se que para distâncias de DL inferiores a diferença entre **LSCI** é superior à diferença para baixos valores de DL. Para baixos valores valores de *exposure time* pode verificar-se que o comportamento da diferença é mais inconstante ao longo das imagens adquiridas.

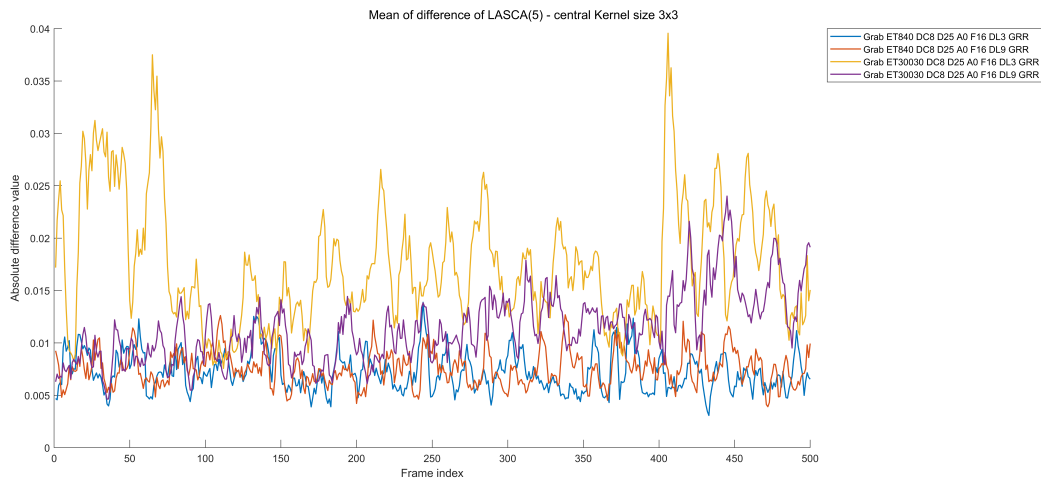


Figura 54: Média do valor de diferença absoluta, de uma janela de 3x3, entre *frames LSCI* com diferentes valores de 'DL' e tempos de exposição distintos.

5.3 VARIAÇÃO DO f/#

A fim de compreender a influência da variação da abertura do diafragma da lente utilizada, na informação *speckle* registada em cada uma das câmaras, procedeu-se à realização de experiências onde se realizou a alteração deste parâmetro. Limitado ao *hardware* utilizado para a realização deste *setup*, através do método experimental, optou-se adotar os valores para 'f/#' apresentados na Figura 55 e na Figura 56.

Ao analisar a Figura 55 pode verificar-se que a variação do valor de 'f/#' tem alguma influência na informação que é adquirida pelas diferentes câmaras de modo a calcular as imagens *LSCI*. Pode assim constatar-se que a diminuição do valor de 'f/#' (por outras palavras, a abertura do diafragma da lente), faz com o fator de correlação entre as diferentes vistas das imagens *LASCA* diminua (quando os outros parâmetros não sofrem alteração). É de notar que a variação do mesmo parâmetro ('f/#') para um tempo de exposição elevado tem um grau de influência superior no fator de correlação.

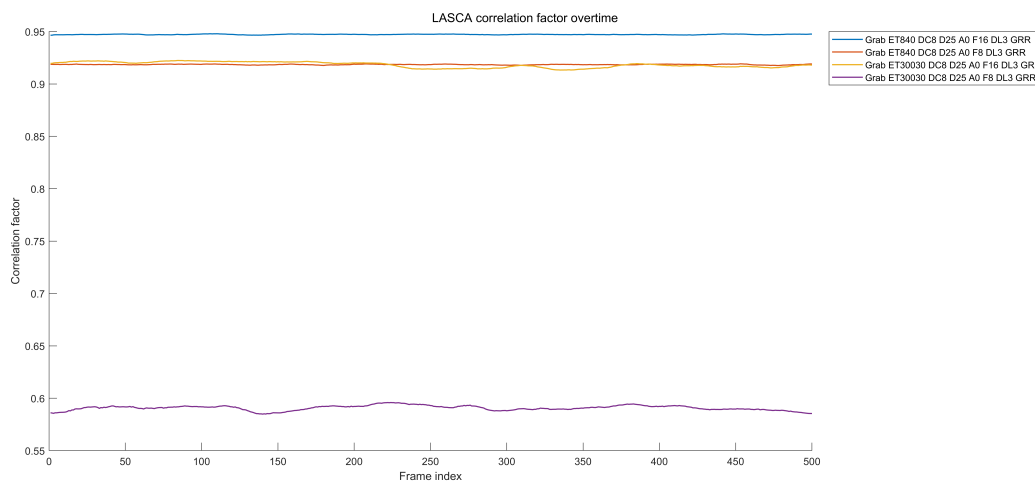


Figura 55: Factor de correlação entre *frames LSCI* com diferentes valores de 'f/#' e tempos de exposição distintos.

Na Figura 56 pode-se visualizar que o comportamento das curvas apresentadas transmitem que a diferença entre as imagens *LASCA* aumenta quando se diminui o valor de 'f/#'. Mais uma vez, verifica-se que a diferença entre as vistas *LSCI* aumenta quando é utilizado um tempo de exposição mais elevado, uma vez que na Figura 56 constata-se que o valor médio da diferença aumenta quando o 'f/#' diminui. Quando é utilizado um tempo de exposição mais baixo estas diferenças não têm tanto enfase uma vez que as curvas estão mais próximas.

RESULTADOS

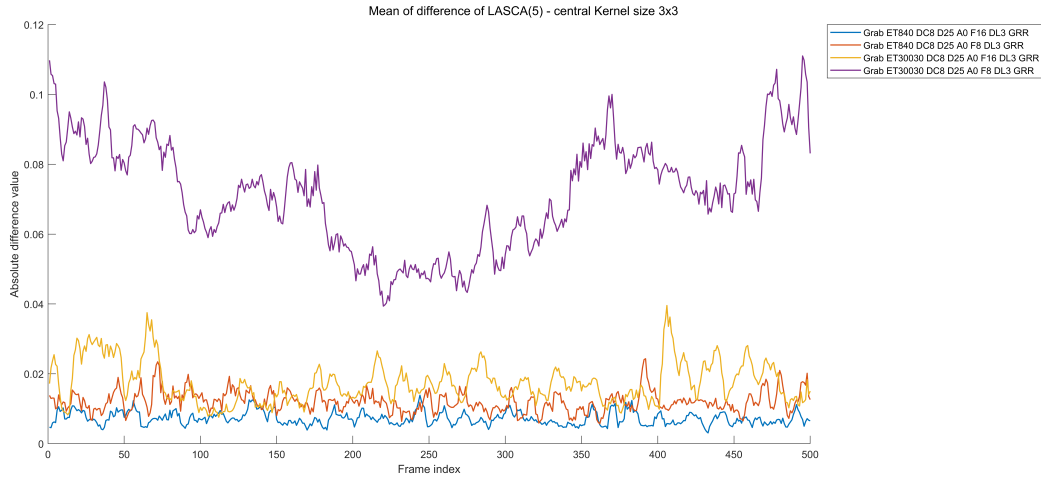


Figura 56: Média do valor de diferença absoluta, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'f/#' e tempos de exposição distintos.

5.4 VARIAÇÃO DO ÂNGULO PANORÂMICO DAS CÂMARAS

Sabemos à partida que o ângulo panorâmico (Θ_R e Θ_L presente na Figura 35) realizado por cada câmara influencia diretamente a informação que se obtém do plano que se está a observar, podendo assim aumentar ou diminuir a área comum que pode ser captada pelas câmaras (por outras palavras, o campo de visão ou *field of view*). Como a distância da *baseline* ao ponto de convergência dos planos de imagem das duas câmaras é diretamente influenciado pelo ângulo panorâmico realizado por cada câmara, assim como o campo de visão, procedeu-se à realização de experiências onde se alterou o valor deste parâmetro (o ângulo panorâmico de cada câmara). Por consequência, optou-se por adotar duas amplitudes distintas mas que são constantes para ambas as câmaras. Em um dos casos optou-se por uma abordagem onde a convergência entre as câmaras era nula, tendo como objetivo compreender a diferença da informação adquirida entre uma situação com convergência e outra onde esta fosse desprovida. Não esquecendo a limitação do material e da disposição utilizado na estipulação destas amplitudes.

Desta forma, pode ser visualizado na Figura 57 que o resultado da variação desta amplitude ('A') para dois tempos de exposição diferentes. Em primeira instância é de notar que a mudança destes ângulos influenciam os resultados obtidos, evidenciando o facto de que ao aumentar o ângulo panorâmico de cada câmara resulta numa diminuição do factor de correlação, ou seja a diferença entre as LSCI obtidas de cada vista aumenta. Mais uma vez o aumento do tempo de exposição tem alguma

influência neste resultado, como se pode verificar na Figura 57, onde o facto de aumentar este parâmetro faz com que a diferença entre as curvas seja mais acentuada.

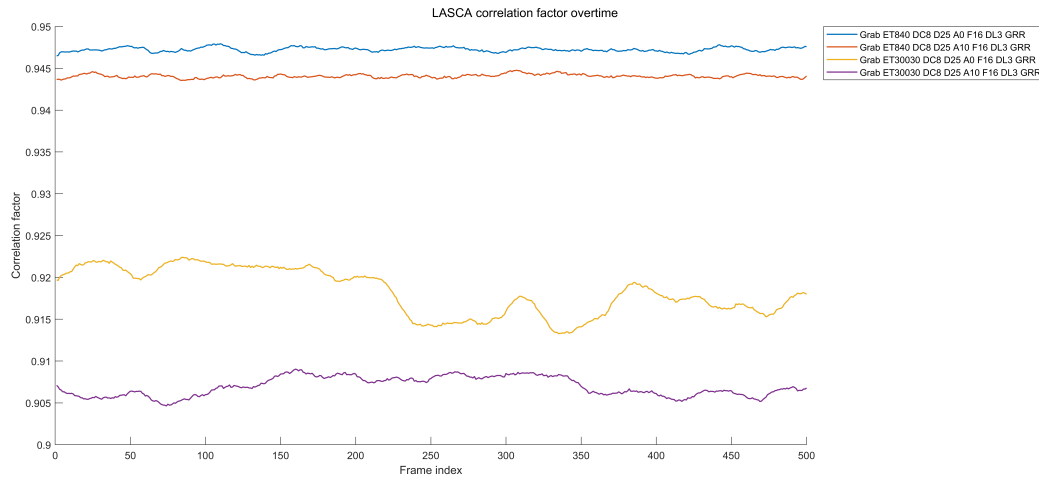


Figura 57: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'A' e tempos de exposição distintos.

Analisando agora o comportamento da diferença de valor absoluto apresentado na Figura 58, podemos averiguar que a diferença entre as LSCI dos diferentes pontos de vista é mais acentuada quando o sensor da câmara se encontra mais tempo exposto. Por outro lado, pode verificar-se que o comportamento dos valores que correspondem ao menor tempo de exposição implementado são díspares (para diferentes valores de ângulos panorâmicos). No entanto, existem picos ao longo do tempo embora as linhas tenham uma proximidade muito elevada.

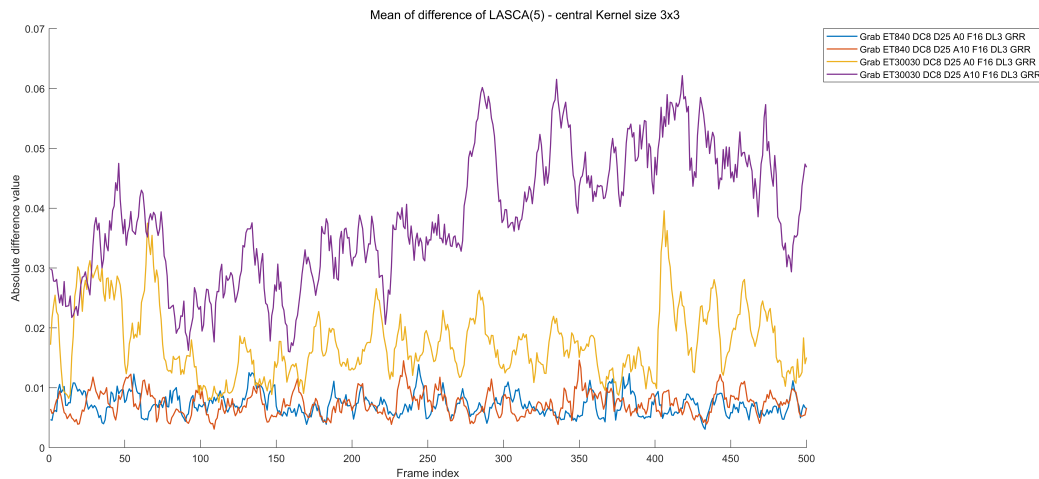


Figura 58: Média do valor de diferença absoluta, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'A' e tempos de exposição distintos.

5.5 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE CÂMARAS

Como a distância entre as câmaras influencia a área comum do plano que estas extraem informação, procedeu-se à realização de várias aquisições com valores de distâncias entre câmaras distintos, dos quais foram selecionados dois de modo a fazer uma comparação. A seleção destes valores teve em consideração as limitações da disposição do material utilizado, assim como a qualidade das imagens adquiridas para processamento. O ponto de convergência para estes valores de distância entre as câmaras foi um fator que não se teve em consideração uma vez que era feito o ajuste por *software* da zona do sensor de imagem que seria utilizada. Isto é possível, uma vez que para efeitos de alcance de determinados valores de *frame rate* não é possível adquirir imagens com a máxima resolução possível (1920 x 1080 pixels).

Avançando com a análise de resultados, é possível verificar na Figura 59 que a proximidade de valores do factor de correlação é existente. Por exemplo, no caso onde o tempo de exposição tem valor de 840 μ s podemos verificar que a disparidade de valores entre as duas curvas (para as diferentes distâncias) não é muito acentuada. Por outro lado, no caso em que o tempo de exposição é de \approx 30ms o factor de correlação tem valores com distinções mais acentuadas. É de notar que todas as curvas têm comportamentos distintos, ainda que, para o valor de *exposure time* mais baixo não seja a diferença muito acentuada mas as curvas não são iguais. No caso em que o tempo de exposição é mais elevado, as curvas tendem a aproximar-se mas ainda assim a distância entre estas é superior à distância apresentada para o outro tempo de exposição evidenciado no gráfico.

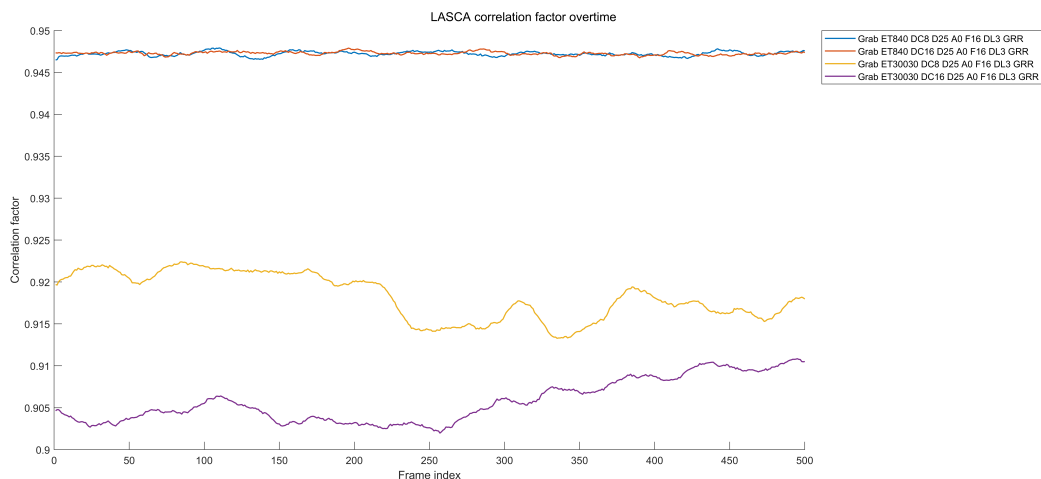


Figura 59: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'DC' e tempos de exposição distintos.

Relativamente à análise dos valores apresentados na Figura 60, que correspondem à diferença dos valores determinados pela análise *LASCA* das imagens adquiridas, é possível concluir que a diferença entre todas as curvas não é muito elevada. É de notar a existência de uns picos quando o tempo de exposição tem o maior valor implementado. Separando a análise em tempos de exposição, é possível verificar que onde existe mais distância entre os valores ao longo do tempo é quando o *exposure time* é de ≈ 30 ms. Por outro lado, quando se trata da experiência onde o tempo de exposição é de 840μ s, as diferenças são mínimas mas o suficiente para gerar comportamentos diferentes.

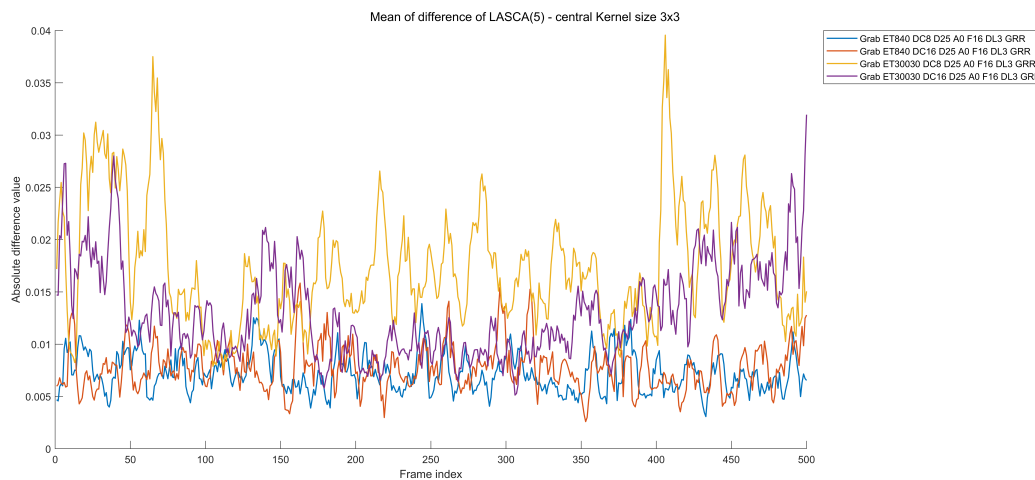


Figura 60: Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3×3 , entre *frames LSCI* com diferentes valores de 'DC' e tempos de exposição distintos.

5.6 VARIAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE A CÂMARA E A FACE DO OBJETO

A distância a que se encontra o objeto da câmara é um fator que influencia diretamente o foco da lente utilizada, de modo a que se o resultado seja uma imagem focada. Com o intuito de analisar o resultado da variação deste parâmetro nos resultados obtidos, fixando os outros parâmetros, procedeu-se à realização de procedimentos experimentais. As distâncias implementadas na obtenção dos resultados da Figura 61 e da Figura 62 foram definidas através do método experimental.

Analisando a Figura 61 pode constatar-se que a gama de valores do fator de correlação não é muito extensa, ainda assim é possível identificar que a maior alteração nos resultados é obtida quando se trata da experiência em que o tempo de exposição é mais elevado (considerando assim que a diferença de valores é acentuada, considerando a escala apresentada). Todas as experiências apresentadas na Figura

61 apresentam comportamentos diferentes. Mais uma vez a proximidade dos valores do factor de correlação é acentuada na experiência em que o tempo de exposição é mais baixo.

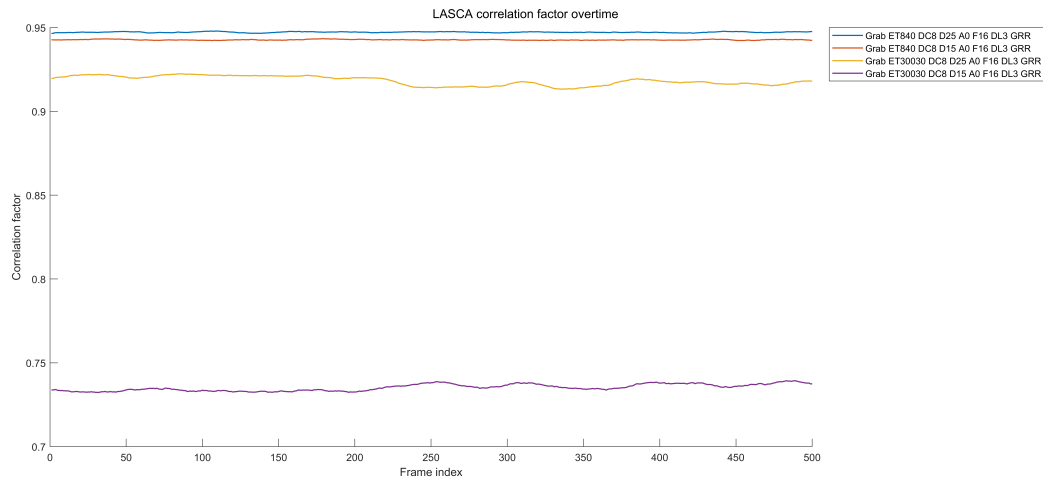


Figura 61: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'D' e tempos de exposição distintos.

No que diz respeito à variação do valor da diferença entre as vistas das LSCI, pode verificar-se na Figura 62 que o resultado do processamento das imagens obtidas não diferem muito devido à gama de valores apresentada. Ainda assim, é possível notar a existência de picos bastante acentuados em uma das experiências, o que permite evidenciar que a maior disparidade de valores existe quando o tempo de exposição é o mais elevado, onde se pode observar que a diminuição deste parâmetro (distância entre a câmara e a face do objeto) origina no aumento da diferença entre o comportamento das LSCI das diferentes vistas. Com um comportamento inalterável, são apresentadas as experiências onde o tempo de exposição tem o menor valor (ainda que apresente um comportamento com alguma irregularidade), mas também se comprova que a diminuição do mesmo aumenta a diferença da informação registada.

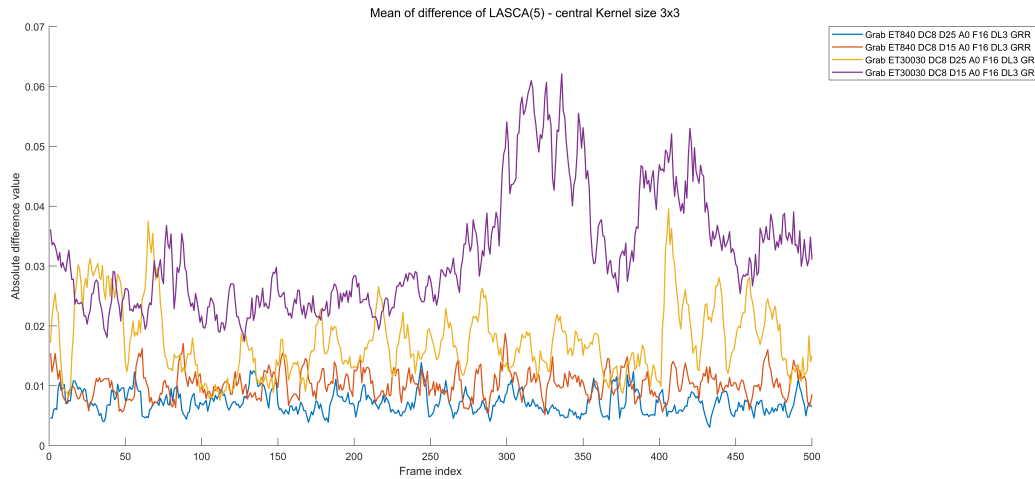


Figura 62: Média do valor de diferença absoluta, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'D' e tempos de exposição distintos.

5.7 VARIAÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO

O tempo de exposição aparenta ser o parâmetro que se apresenta com mais influência na alteração do valor dos resultados. Uma vez que o fenômeno do *speckle* trata da interferência de frentes de onda coerentes que são refletidas, sendo um processo altamente dinâmico, este é afetado diretamente pelo tempo de exposição do sensor. Como o sensor que capta a informação luminosa e traduz este valor para um determinado valor (dependendo do modo de funcionamento do sensor explicado, como já foi explanado anteriormente), este valor é influenciado pela quantidade de tempo que o sensor se encontra exposto.

De modo a compreender a influência deste parâmetro nos resultados, são apresentados na Figura 63 e na Figura 64 o resultado do processamento de algumas experiências realizadas. Nestas experiências de aquisição apenas varia o parâmetro do tempo de exposição. A gama de valores deste parâmetro realizou-se atendendo à gama de valores (para intervalos de *exposure time*) apresentada em [28], bem como pelas delimitações apresentadas pelas câmaras utilizadas (resolução utilizada, tempos de leitura do sensor, tempos de transmissão). Assim, pode verificar-se na Figura 63 que o comportamento resultante das aquisições onde o tempo de exposição é menor são muito semelhantes. Não existe nenhum comportamento exatamente igual, uma vez que se trata de um fenômeno aleatório, mas a maior disparidade visualizada ao longo das frames é durante a experiência com mais tempo de exposição. É de notar, também, que à medida que o tempo de exposição aumenta o factor de correlação diminui.

RESULTADOS

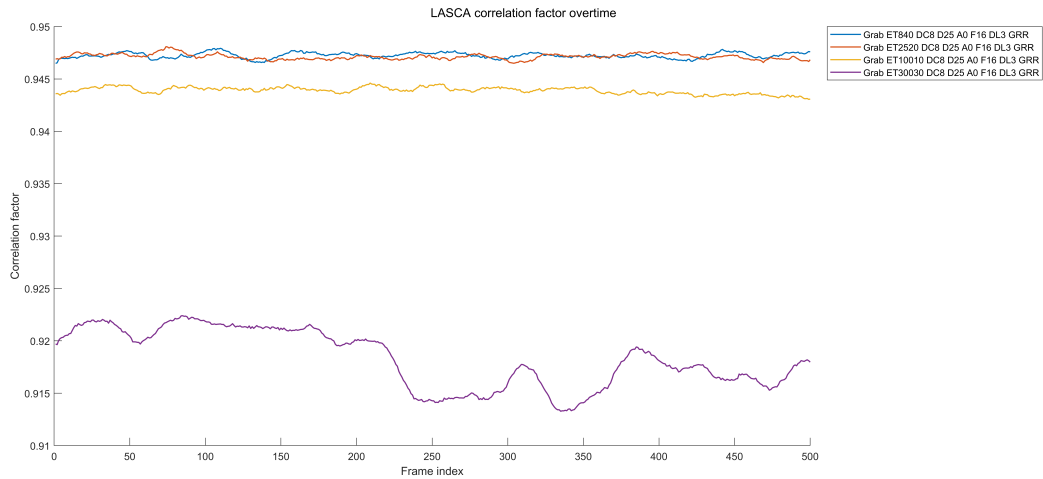


Figura 63: Factor de correlação entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'ET'.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 64, pode verificar-se que a diferença entre as imagens LSCI das diferentes vistas é mais acentuada na experiência em que o tempo de exposição é mais elevado. Nas restantes experiências existe disparidade no comportamento no decorrer da aquisição, mas a «diferença de valores não é muito acentuada.

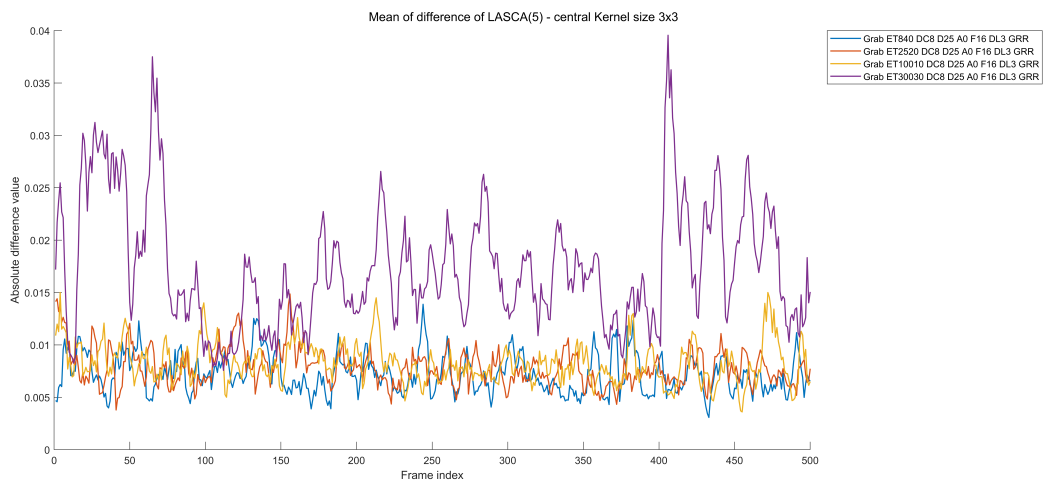


Figura 64: Média do valor de diferença absoluto, de uma janela de 3x3, entre *frames* LSCI com diferentes valores de 'ET'.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas conclusões relacionadas com o trabalho apresentado anteriormente. O capítulo encontra-se dividido em três partes, das quais: a apresentação de conclusões dos resultados obtidos; a divulgação da contribuição para o conhecimento da comunidade científica; e em última instância algumas sugestões de trabalho futuro.

6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação tem um objetivo central de investigar a influência de um conjunto de variáveis físicas na informação de *laser speckle* que é registada por um sistema de aquisição *stereo*, e um outro que se prende com o anterior de construção de um *setup* de aquisição *stereo* que permita, de forma precisa, realizar processos experimentais de teste. Por dinamização das experiências, entende-se a alteração da disposição da posição das câmaras (distância entre as câmaras, ângulo de vergência), assim como a alteração de parâmetros das câmaras (abertura da lente do diafragma, *frame rate*, tempo de exposição). Isto tudo para compreender qual é o parâmetro num *setup* de aquisição de imagens *stereo* de *laser speckle* que tem mais influência no comportamento de formação do padrão de *speckle* adquirido pelo sensor.

Assim sendo, realizou-se a conceção do *setup* de imagens *stereo* recorrendo a câmaras monocromáticas, de 8 bits, que utilizavam uma *interface* 'GigE'. De seguida, após o aprimoramento do funcionamento do *setup*, obtiveram-se as imagens *raw* que caracterizavam o comportamento dos padrões produzidos nas experiências de aquisição. Após o processamento das mesmas imagens de modo a obter as LSCI de cada experiência, produziram-se dados quantitativos que caracterizam a informação obtida entre as imagens de cada vista.

Através dos resultados obtidos, podemos concluir que a variação dos parâmetros em estudo produzem resultados distintos ao nível da informação que se regista à esquerda e à direita, pelo que tais parâmetros têm de ser definidos aquando uma aquisição em *speckle* 3D. O parâmetro cuja a variação apresenta mais influência

nos resultados é o tempo de exposição definido em cada experiência. De facto o aumento do valor deste parâmetro na experiência de aquisição, implica a diminuição do *frame rate* utilizado (isto é uma consequência do modelo da câmara utilizada).

A mudança do valor da distância entre a lente que direciona o feixe luminoso e o difusor apresenta alguma diferença no comportamento entre as imagens *LSCI* da esquerda e da direita, mas pode considerar-se que é baixa. Só quando se utiliza um tempo de exposição mais elevado, existem alguns momentos, em que a diferença é mais acentuada.

O valor do parâmetro $f/\#$, quando variado, apresenta grandes discrepâncias no comportamento do padrão de *speckle* desde que se trate de aquisições com tempos de exposição elevadas. Ao comparar os resultados obtidos para o menor e o maior tempo de exposição elevado ($840\mu s$ e $\approx 30ms$, respetivamente), a discrepância de valores é bastante acentuada.

A variação do ângulo panorâmico entre as câmaras também modifica a informação obtida entre a esquerda e a direita. Esta influência nota-se tanto para valores baixos do tempo de exposição ($840\mu s$) como para valores mais elevados ($\approx 30ms$), mas torna-se mais acentuada nos valores de tempo de exposição mais elevados.

No caso da distância entre as câmaras, existem diferenças no comportamento entre as vistas, mas quando comparando com os resultados obtidos da variação do $f/\#$ para o máximo tempo de exposição utilizado, estas diferenças podem ser consideradas baixas. O mesmo acontece no caso da modificação da distância entre o objeto e a câmara, onde existe mais diferença nos resultados é para os casos onde se utiliza o máximo valor de tempo de exposição, mas quando comparado com os resultados da variação de $f/\#$ (para $\approx 30ms$ de *exposure time*) pode se considerar que esta diferença é de baixo valor.

6.2 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Parte do trabalho realizado no âmbito desta dissertação, originou uma publicação em conferência.

- F. Salgueiro, P. A. Assunção and R. Fonseca-Pinto, "**Laser Speckle Stereo System in Biomedical Imaging**", 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), 2020, pp. 288-291, doi: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245131.

6.3 PROPOSTA DE TRABALHO FUTURO

No que respeita a trabalho futuro, vários são os aspetos que podem vir a ser melhorados ou explorados em relação ao aprofundamento dos tipos e níveis de influência dos parâmetros enunciados. Desta forma, uma proposta de trabalho futuro essencial é a realização de experiências idênticas num ambiente mais controlado, assim poderia descartar-se a influencia de outras componentes luminosas e obter com exatidão como os parâmetros enunciados influenciam o comportamento do padrão de *laser speckle* gerado.

Outra proposta de trabalho futuro crucial, é a alteração das câmaras utilizadas de modo a que possa ser variado o tempo de exposição utilizado na aquisição sem que o frame rate sofra alteração de experiência para experiência. Desta forma, poderia ser realizada uma análise temporal mais precisa.

Uma vez que o fenómeno que se pretende caracterizar apresenta súbitas mudanças de estado, é necessário utilizar um sensor (CMOS, por exemplo) que inicie o tempo de exposição em simultâneo nas linhas (de pixéis) do sensor de imagem. Ou seja, o modo de disparo do sensor de imagem utilizado deve possibilitar o *Global Shutter Mode* (apresentado na Figura 23).

Adicionalmente, será de interesse implementar um algoritmo de compensação de luminosidade idêntico ao apresentado em [24]. Dessa maneira, poderia verificar-se se o comportamento identificado nas experiências realizadas seria identificado ou se variava à medida que os parâmetros seriam alterados.

Com o objetivo de validar as conclusões obtidas, é uma análise do comportamento do *laser speckle* num sistema de aquisição *stereo* utilizando descritores que tenham uma base diferente da análise do contraste das imagens obtidas. Sugerindo também uma análise de comparação da informação entre as diferentes vistas, como por exemplo métodos de *Machine Learning*, uma vez que o comportamento do *laser speckle* pode gerar padrões de diferentes intensidades. Desta forma poderia-se realizar uma comparação entre zonas de modo a contestar os resultados obtidos através do processamento implementado no decorrer deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Vaz, “Methods for hemodynamic parameters measurement using the laser speckle effect in macro and microcirculation”, tese de doutoramento, dez. de 2016.
- [2] D. Khan, M. A. Shirazi e M. Y. Kim, “Single shot laser speckle based 3D acquisition system for medical applications”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 105, pp. 43–53, 2018, ISSN: 01438166. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2018.01.001](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.01.001). URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.01.001>.
- [3] C. Daffara e E. Marini, “A Portable Compact System for Laser Speckle Correlation Imaging of Artworks Using Projected Speckle Pattern”, *Journal of Imaging*, vol. 6, n.º 11, p. 119, 2020, ISSN: 2313433X. DOI: [10.3390/jimaging6110119](https://www.mdpi.com/2313-433X/6/11/119/htm). URL: <https://www.mdpi.com/2313-433X/6/11/119/htm><https://www.mdpi.com/2313-433X/6/11/119>.
- [4] C. Weber, A. L. Dai Pra, L. I. Passoni, H. J. Rabal, M. Trivi e G. J. Poggio Aguerre, “Determination of maize hardness by biospeckle and fuzzy granularity”, *Food Science and Nutrition*, vol. 2, n.º 5, pp. 557–564, 2014, ISSN: 20487177. DOI: [10.1002/fsn3.130](https://doi.org/10.1002/fsn3.130).
- [5] F. Zilly, J. Kluger e P. Kauff, “Production rules for stereo acquisition”, em *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, 2011, pp. 590–606. DOI: [10.1109/JPROC.2010.2095810](https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2095810).
- [6] Sing Bing Kang, J. Webb, C. Zitnick e T. Kanade, “A multibaseline stereo system with active illumination and real-time image acquisition”, em *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE Comput. Soc. Press, pp. 88–93, ISBN: 0-8186-7042-8. DOI: [10.1109/ICCV.1995.466802](https://doi.org/10.1109/ICCV.1995.466802). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/466802/>.
- [7] P. Hu, X. Hao, J. Li, C. Cheng e A. Wang, “Design and Implementation of Binocular Vision System with an Adjustable Baseline and High Synchronization”, em *2018 3rd IEEE International Conference on Image, Vision and Computing, ICIVC 2018*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 566–570, ISBN: 9781538649916. DOI: [10.1109/ICIVC.2018.8492907](https://doi.org/10.1109/ICIVC.2018.8492907).

- [8] A. Z. Zhu, Y. Chen e K. Daniilidis, “Realtime time synchronized event-based stereo”, em *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11210 LNCS, 2018, pp. 438–452, ISBN: 9783030012304. DOI: [10.1007/978-3-030-01231-1_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01231-1_27). URL: <https://daniilidis-group.github.io/mvsec/>.
- [9] C. Sui, K. He, C. Lyu, Z. Wang e Y. H. Liu, “3D surface reconstruction using a two-step stereo matching method assisted with five projected patterns”, em *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2019-May, IEEE, 2019, pp. 6080–6086, ISBN: 9781538660263. DOI: [10.1109/ICRA.2019.8794063](https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794063). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8794063/>.
- [10] J Duarte e P. A. Assunção, “Low-complexity acquisition of 180-degree panoramic video using early data reduction”, em *IEEE International Conference on Smart Technologies EUROCON*, 2019, pp. –.
- [11] A. Kumar, Y. Y. Wang, C. J. Wu, K. C. Liu e H. S. Wu, “Stereoscopic laparoscopy using depth information from 3D model”, em *2014 IEEE International Symposium on Bioelectronics and Bioinformatics, IEEE ISBB 2014*, IEEE Computer Society, 2014, ISBN: 9781479927708. DOI: [10.1109/ISBB.2014.6820904](https://doi.org/10.1109/ISBB.2014.6820904).
- [12] K. Xu, J. Zhao e Z. Dai, “A foldable stereo vision unit for Single Port Access Laparoscopy”, em *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Institute of Electrical e Electronics Engineers Inc., 2014, pp. 4182–4187. DOI: [10.1109/ICRA.2014.6907467](https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907467).
- [13] L. Jonker, “Skin Lesion Surface Area and Erythema Intensity Calculation for PASI Determination using Stereo Vision”, 2019.
- [14] F. Cunha, L. Távora, P. Assunção, S. Faria e R. FonsecaPinto, “Stereo laser speckle dissimilarity analysis using self-organizing maps”, em *IFMBE Proceedings*, vol. 73, Springer Verlag, 2020, pp. 51–60, ISBN: 9783030179700. DOI: [10.1007/978-3-030-17971-7_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-17971-7_8).
- [15] Y. Gao, J. Li, J. Li e S. Wang, “Modeling the convergence accommodation of stereo vision for binocular endoscopy”, *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 14, n.º 1, 2018, ISSN: 1478596X. DOI: [10.1002/rcs.1866](https://doi.org/10.1002/rcs.1866).
- [16] A. Orriordan, T. Newe, G. Dooly e D. Toal, “Stereo vision sensing: Review of existing systems”, em *Proceedings of the International Conference on Sensing*

- Technology, ICST*, vol. 2018-Decem, IEEE Computer Society, 2019, pp. 178–184, ISBN: 9781538651476. DOI: [10.1109/ICSensT.2018.8603605](https://doi.org/10.1109/ICSensT.2018.8603605).
- [17] D. Filipa e S. Capela, “Hemodynamic Parameters Extraction using Laser Speckle Effect”, tese de doutoramento, 2014. URL: <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/27998>.
- [18] G. L. Cloud, “Laser and white-light speckle techniques: A tutorial review”, em *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 12, Springer, Cham, 2019, pp. 141–172, ISBN: 9783319974804. DOI: [10.1007/978-3-319-97481-1_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97481-1_21). URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-97481-1_21.
- [19] D. Francis, T. O. Charrett, L. Waugh e R. P. Tatam, “Objective speckle velocimetry for autonomous vehicle odometry”, *Applied Optics*, vol. 51, n.º 16, pp. 3478–3490, 2012, ISSN: 15394522. DOI: [10.1364/AO.51.003478](https://doi.org/10.1364/AO.51.003478). URL: <https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=ao-51-16-3478&seq=0&html=truehttps://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=ao-51-16-3478https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-51-16-3478>.
- [20] *Research Multimedia « Joshua Hill*, <http://jchill.rice.edu/research-images/>, (Accessed on 01/24/2022).
- [21] *CCD vs CMOS | Teledyne DALSA*, <https://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>, (Accessed on 12/03/2021).
- [22] *CMOS Image Sensors (CIS): Past, Present & Future - Coventor*, <https://www.coventor.com/blog/cmos-image-sensors-cis-past-present-future/>, (Accessed on 11/18/2021).
- [23] K. Chen, T. Shi, Q. Liu, Z. Tang e G. Liao, “Microscopic three-dimensional measurement based on telecentric stereo and speckle projection methods”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, n.º 11, p. 3882, 2018, ISSN: 14248220. DOI: [10.3390/s18113882](https://doi.org/10.3390/s18113882). URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/11/3882>.
- [24] D. Khan e M. Y. Kim, “High-density single shot 3D sensing using adaptable speckle projection system with varying preprocessing”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 136, p. 106 312, 2021, ISSN: 01438166. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2020.106312](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106312).
- [25] Basler AG, “Basler ace USER’S MANUAL FOR GigE CAMERAS”, rel. téc., 2016.

- [26] F. Barranco, J. Diaz, A. Gibaldi, S. P. Sabatini e E. Ros, “Vector disparity sensor with vergence control for active vision systems”, *Sensors*, vol. 12, n.º 2, pp. 1771–1799, 2012, ISSN: 14248220. DOI: [10.3390/s120201771](https://doi.org/10.3390/s120201771). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1771/html><https://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1771>.
- [27] *OpenCV: Basic concepts of the homography explained with code*, https://docs.opencv.org/4.x/d9/dab/tutorial_homography.html, (Accessed on 02/25/2022).
- [28] A. Nadort, R. G. Woolthuis, T. G. van Leeuwen e D. J. Faber, “Quantitative laser speckle flowmetry of the in vivo microcirculation using sidestream dark field microscopy”, *Biomedical Optics Express*, vol. 4, n.º 11, p. 2347, 2013, ISSN: 2156-7085. DOI: [10.1364/boe.4.002347](https://doi.org/10.1364/boe.4.002347). URL: <https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=boe-4-11-2347&seq=0&html=true><https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=boe-4-11-2347><https://www.osapublishing.org/boe/abstract.cfm?uri=boe-4-11-2347>.

ANEXOS



PARÂMETROS CONFIGURÁVEIS DA INTERFACE GRÁFICA

```
=====
*                                     *
*                               Stereo Cameras Interface                               *
*                                     *
=====
```

----- ACQUISITION CONTROLS

Exposure Time - Represents the amount of time (in microseconds) that the camera sensor is exposed.

----- TRANSPORT LAYER

Packet Size - Sets the packets size in bytes.

Inter Packet Delay - Sets a delay (in ticks) between the transmission of each packet for the two camera streams.

----- OPERATING PARAMETERS

Acquisition Period - Sets the amount of time (in seconds) that the acquisition will take.

Maximum Buffer Size - Sets the maximum value of images for each camera. Must be greater than acquisition period [s] x frame rate [fps].

Frame Rate - Sets the frame rate for the two cameras.

----- DIRECTORIES

Destination Path - Sets the directory to store the grab results. The default location is settled for "Documents" folder.

Open Path - Open a window to choose the directory where you want to save the outputs.

Acquisition Folder - Sets the name of the acquisition experience result folder (by default is the date and time it occurred).

----- AOI CONTROLS

ROI Width - Sets the width of the Region Of Interest. This value must be between 0 and 1920.

ROI Height - Sets the height of the Region Of Interest. This value must be between 0 and 1080.

ROI Offset X - Sets the horizontal position where the ROI will begin. This value must be less than the difference between the maximum frame length (1920 pixel) and the intended ROI length.

ROI Offset Y - Sets the vertical position where the ROI will begin. This value must be less than the difference between the maximum frame height (1080 pixel) and the intended ROI height.

Center ROI - If enabled the values on ROI Offset does not affect the location of ROI on camera sensor. Center the ROI on the camera sensor.

ACTIONS

Reset Cameras Parameters - This button reset all cameras parameters.

Set Parameters - This button will set on the program intern variables the values correspondent to all input parameters, for both cameras.

Start Acquisition - This button will initiate the process of frames acquisition and it will store allthe frames grabbed after completing the acquisition period.

Start Preview - This button will initiate the process of viewing camera streaming (without store the frames acquired).

Concepts to consider to use Basler acA1920-25gm

Author: *Filipe Salgueiro*

- [Using Basler acA1920-25gm](#)
 - [Install "pylon"](#)
 - [Possible ways to produce image acquisition](#)
- [Camera Network connection](#)
 - [Power supplied](#)
 - [Switch connections](#)
- [Configuration of external Network Adapter \(Hub USB Ewent\)](#)
 - [Configure the Network Adapter](#)
 - [Network Adapter Properties Configuration](#)
 - [Install the Correct Network Adapter driver](#)
- [Camera Network Configuration](#)

Using Basler acA1920-25gm

Camera Communication Interface: Gigabit Ethernet (**GigE**)

For more information about **Basler acA1920-25gm**, check:

- the **PDF** file on "Docs" folder
- <https://docs.baslerweb.com/aca1920-25gm>

Install "pylon"

NOTE: The installer is located at "*Software\pylon_5.2.0_Windows*". After installation you can check the camera(s) through "**pylon Viewer**".

1. Run "Basler_pylon_5.2.0.13457.exe"
2. Choose "Developer" Profile
3. Choose "GigE" Interface
4. Install

Possible ways to produce image acquisition

- **By "pylon Viewer"**
- **By scripts**
 - C++
 - To check examples: "*C:\Program Files\Basler\pylon 5\Development\Samples\C++*"
 - To check documentation: "*C:\Program Files\Basler\pylon 5\Development\Documentation*"
 - Python ([pypylon](#))
 - Install pypylon: `pip3 install pypylon`

- Check the examples presented "samples" folder

NOTE: In order for communication to take place, all components must be on the same network.

Camera Network connection

- <https://docs.baslerweb.com/aca1920-25gm#physical-interface>

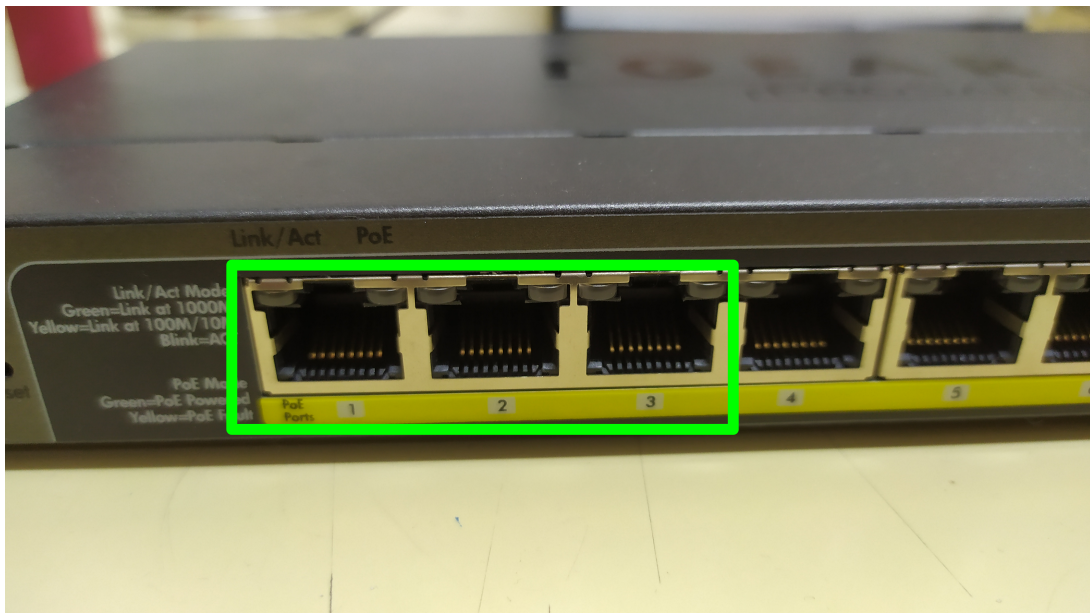
Power supplied

- Via Ethernet connection: Power over Ethernet (PoE)
- Via I/O connector

Switch connections

NOTE: The GS110TP switch enables PoE.

It was necessary to configure the size of the jumbo frames of the ports used to the maximum so as not to lose packets in the transmission of images. The following figure shows the ports that are correctly configured for using the cameras.



Configuration of external Network Adapter (Hub USB Ewent)

Configure the Network Adapter

1. Open run window ("Windows Key" + "R")
2. Run "ncpa.cpl" command
3. Right click on the desired network card
4. Click on "Properties"
5. Select IPv4 protocol and click on "Properties" button
6. Select "Use the following IP address:" and fill with the following information:
 - 6.1. IP address: 192.168.0.4
 - 6.2. Subnet mask: 255.255.255.0
 - 6.3. Default gateway: 192.168.0.3
7. Click on "Ok" to save the changes.

Network Adapter Properties Configuration

NOTE: If the parameters do not appear, you must install the card suggested in the next topic.

1. Open run window ("Windows Key" + "R")
2. Run "ncpa.cpl" command
3. Right click on the desired network card
4. Click on "Properties"
5. Click on "Configure..." button (in the properties window)
6. Go to "Advanced" tab
7. Select "Jumbo Frames" property and set it to the maximum value allowed
8. Select the "Speed and Duplex Mode" and set it to "Auto Negotiation"
9. Click on "Ok" to save the changes

Install the Correct Network Adapter driver

NOTE: Before proceeding you must unzip the folder "Realtek USB GbE Family Controller.7z".

1. Open run window ("Windows Key" + "R")
2. Run "ncpa.cpl" command
3. Right click on the desired network card
4. Click on "Properties"
5. Click on "Configure..." button (in the properties window)
6. Go to "Driver" tab
7. Click on "Update Driver" button
8. Select "Browse my computer for drivers"
9. Click on "Browse..." button and choose the path for the unzip folder (for example, "D:\Realtek USB GbE Family Controller")
10. Click on "Next" button and proceed until the installation is complete

Camera Network Configuration

If the cameras are not being recognized in the "**pylon Viewer**", you must access "**pylon IP Configurator**" and check which IP is assigned to the cameras. This process can also be used to change the IP of the cameras, if necessary.

NOTE: "**pylon**" should already be installed.

1. Open "pylon IP Configurator"
2. To the Camera 2276035
 1. IP Address: 192.168.0.1
 2. Subnet Mask: 255.255.255.0
3. To the Camera 2276036
 1. IP Address: 192.168.0.2
 2. Subnet Mask: 255.255.255.0



GUIA DE UTILIZADOR DA INTERFACE DESENVOLVIDA

Stereo Image Acquisition Application - User's Guide

Author: *Filipe Salgueiro*

- [Steps to do before run GUI ".exe" file](#)
 - [Install "pylon"](#)
 - [Install OpenCV 4.1.2](#)
- [Camera Network connection](#)
 - [Power supplied](#)
 - [Switch connections](#)
- [Configuration of external Network Adapter \(Hub USB Ewent\)](#)
 - [Configure the Network Adapter](#)
 - [Network Adapter Properties Configuration](#)
 - [Install the Correct Network Adapter driver](#)
- [Camera Network Configuration](#)
- [References](#)

Steps to do before run GUI ".exe" file

Install "pylon"

NOTE: The installer is located at "*Software\pylon_5.2.0_Windows*". After installation you can check the camera(s) through "**pylon Viewer**".

1. Run "Basler_pylon_5.2.0.13457.exe"
2. Choose "Developer" Profile
3. Choose "GigE" Interface
4. Install

Install OpenCV 4.1.2

1. Run "opencv-4.1.2-vc14_vc15.exe"
2. Choose the directory to unzip the files (for example, "C:\DEV")
3. Add to Environment variables the path for OpenCV files:
 - 3.1. Open run window ("Windows Key" + "R");
 - 3.2. Run "sysdm.cpl" command;
 - 3.3. Go to "Advanced" table and click on "Environment Variables...";
 - 3.4. On "System Variables" edit "Path" variable;
 - 3.5. Click on "New";
 - 3.6. Add "%path_used_on_2%opencv\build\x64\vc14\bin" (for example, "C:\DEV\opencv\build\x64\vc14\bin");
 - 3.7. Save changes.

Camera Network connection

- <https://docs.baslerweb.com/aca1920-25gm#physical-interface>

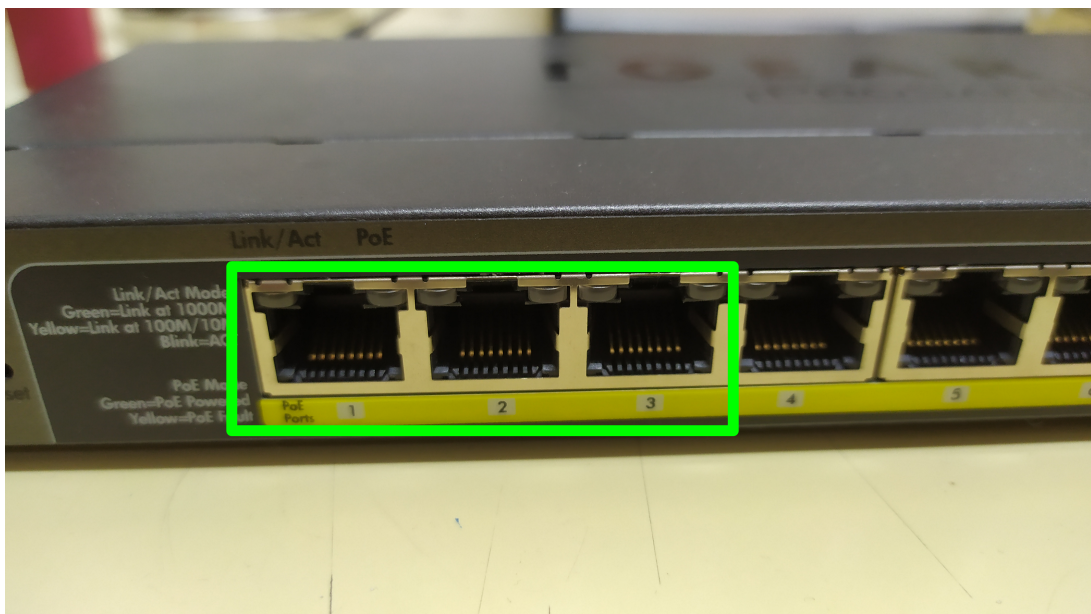
Power supplied

- Via Ethernet connection: Power over Ethernet (PoE)
- Via I/O connector

Switch connections

NOTE: The GS110TP switch enables PoE.

It was necessary to configure the size of the jumbo frames of the ports used to the maximum so as not to lose packets in the transmission of images. The following figure shows the ports that are correctly configured for using the cameras.



Configuration of external Network Adapter (Hub USB Ewent)

Configure the Network Adapter

1. Open run window ("Windows Key" + "R")
2. Run "ncpa.cpl" command
3. Right click on the desired network card

4. Click on "Properties"
5. Select IPv4 protocol and click on "Properties" button
6. Select "Use the following IP address:" and fill with the following information:
 - 6.1. IP address: 192.168.0.4
 - 6.2. Subnet mask: 255.255.255.0
 - 6.3. Default gateway: 192.168.0.3
7. Click on "Ok" to save the changes.

Network Adapter Properties Configuration

NOTE: If the parameters do not appear, you must install the card suggested in the next topic.

1. Open run window ("Windows Key" + "R")
2. Run "ncpa.cpl" command
3. Right click on the desired network card
4. Click on "Properties"
5. Click on "Configure..." button (in the properties window)
6. Go to "Advanced" tab
7. Select "Jumbo Frames" property and set it to the maximum value allowed
8. Select the "Speed and Duplex Mode" and set it to "Auto Negotiation"
9. Click on "Ok" to save the changes

Install the Correct Network Adapter driver

NOTE: Before proceeding you must unzip the folder "*Realtek USB GbE Family Controller.7z*".

1. Open run window ("Windows Key" + "R")
2. Run "ncpa.cpl" command
3. Right click on the desired network card
4. Click on "Properties"
5. Click on "Configure..." button (in the properties window)
6. Go to "Driver" tab
7. Click on "Update Driver" button
8. Select "Browse my computer for drivers"
9. Click on "Browse..." button and choose the path for the unzip folder (for example, "D:\Realtek USB GbE Family Controller")
10. Click on "Next" button and proceed until the installation is complete

Camera Network Configuration

If the cameras are not being recognized in the "**pylon Viewer**", you must access "**pylon IP Configurator**" and check which IP is assigned to the cameras. This process can also be used to change the IP of the cameras,

if necessary.

NOTE: "pylon" should already be installed.

1. Open "pylon IP Configurator"
2. To the Camera 2276035
 1. IP Address: 192.168.0.1
 2. Subnet Mask: 255.255.255.0
3. To the Camera 2276036
 1. IP Address: 192.168.0.2
 2. Subnet Mask: 255.255.255.0

References

- <https://docs.baslerweb.com/network-configuration-%28gige-cameras%29#connecting-via-network-switches>
- F. Salgueiro, P. A. Assunção and R. Fonseca-Pinto, "Laser Speckle Stereo System in Biomedical Imaging," 2020 43rd International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), 2020, pp. 288-291, doi: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245131.