

Universidade Federal do Amazonas - UFAM
Instituto de Ciências Exatas - ICE
Programa de Pós-Graduação em Informática - PPGI

Dissertação de Mestrado em Informática

Detecção do Espaço Livre por Meio de Homografias em Sistemas de Múltiplas Câmeras

por

Isaac Bandeira Brasil

Orientador: José Luiz de Souza Pio

Manaus, 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

A Deus.
A minha família que acreditou e investiu em mim.
A minha noiva Natália Carolina Monteiro Torres.
A todos que contribuíram direta ou indiretamente para essa vitória.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivo	18
1.3.1	Geral	19
1.3.2	Específicos	19
1.4	Organização do Texto	19
2	Fundamentação Teórica	21
2.1	Informação Tridimensional	21
2.1.1	Conceitos Gerais	21
2.1.2	Visão Estéreo	23
	Sistema Estéreo Simples	24
	Parâmetros do Sistema Estéreo	26
	Geometria Epipolar e Retificação Estéreo	27
2.2	Pontos de Interesse	29
2.3	Geometria Projetiva	30
2.3.1	Homografia ou Transformação Projetiva	30
	Algoritmo de <i>Transformação Linear Direta</i>	33
	Solução de H	35
	Solução Sobre-Determinada	35
2.3.2	Método Homogêneo	36
2.3.3	Erro Geométrico da Homografia	37
3	Trabalhos Relacionados	38

4	Metodologia	47
4.1	Aquisição de Imagens	49
4.2	Detecção de Espaço Livre Utilizando Detector de Características	50
4.3	Estimando Distância Utilizando Homografia	52
4.3.1	Utilizando Homografia apenas com uma Imagem	53
4.3.2	Estimando Distância Utilizando Visão Estéreo	54
	Calibração de Câmera	54
	Calibração Estéreo	55
	Triangulação para Estimar Pontos no Mundo	56
5	Resultados Experimentais	58
5.1	Descrição dos Procedimentos Experimentais	58
5.1.1	Material Utilizado	58
5.1.2	Forma de Avaliação dos Resultados Experimentais	59
5.2	Avaliação do Modelo Sintético	60
5.2.1	Aquisição de Imagens	60
5.2.2	Experimento 1 - <i>Detector de Vagas Utilizando o Corner Detection</i>	61
5.2.3	Experimento 2 - <i>Detector de Vagas Utilizando Corner Detection com ruído gaussiano nas imagens</i>	67
5.2.4	Experimento 3 - <i>Detector de Vagas Utilizando Homografia</i>	69
5.2.5	Experimento 4 - <i>Detector de Vagas Utilizando Visão Estéreo</i>	72
5.3	Avaliação Controlada do Modelo em Escala	83
5.3.1	Experimento 1 - <i>Detector de Vagas Utilizando Detector de Características</i>	85
5.3.2	Experimento 2 - Detector de Vagas Utilizando o Detector de Características variando a Iluminação da Cena	86
5.3.3	Experimento 3 - <i>Detector de Vagas Utilizando Homografia</i>	89
5.3.4	Experimento 4 - <i>Detector de Vagas Utilizando Visão Estéreo</i>	93

<i>SUMÁRIO</i>	3
5.4 Avaliação Operacional	100
5.4.1 Experimento 1 - <i>Detector de Vagas Utilizando o Corner Detection</i>	101
5.4.2 Experimento 2 - <i>Detector de Vagas Utilizando Homografia</i>	107
5.4.3 Experimento 3 - <i>Detector de Vagas Utilizando Visão Estéreo</i>	110
6 Conclusão	118
6.1 Trabalhos Futuros	120
6.2 Considerações Finais	120
Referências Bibliográficas	122

Lista de Figuras

2.1	Ilustração do conceito de disparidade	22
2.2	Imagem a esquerda é uma das imagens do par estéreo da face de Emanuele Trucco. A Imagem da direita é a reconstrução tridimensional (Trucco e Verri, 1998)	24
2.3	Importante lembrar que neste simples sistema estéreo a reconstrução depende da solução do problema de correspondência. A profundidade do sistema da esquerda é estimada a partir da disparidade dos pontos correspondentes do sistema da direita. (Trucco e Verri, 1998)	25
2.4	Retificação de um par estéreo. As linhas epipolares associadas ao ponto tridimensional, P estão destacadas de cor mais escura. As linhas epipolares das imagens retificadas de cor mais clara . (Trucco e Verri, 1998)	27
2.5	Ilustração da retificação de imagens. Cada par de linhas de cada imagem tornam-se epipolares, colineares e eixos ópticos paralelos (Trucco e Verri, 1998)	28
2.6	Representação geométrica da homografia H . Representa a homografia H , que mapeia dois planos através de pontos correspondentes entre planos não paralelos.	32
3.1	Modelo sintético de estacionamentos e visualização dos ROI definidos.	38
3.2	Modelo sintético de estacionamento para comparação com os histogramas base de cada vaga.	39

3.3	Histograma de cor (saturação) para cada vaga do estacionamento. Este gráfico mostra que somente utilizar histograma de cor para diferenciação entre vagas ocupada ou livres são ineficientes devido ao seu alto nível de semelhança entre tais regiões.	40
3.4	Histograma de cor (tonalidade) para cada vaga do estacionamento.	41
3.5	Exemplo de imagens de pontos de interesse e resultado após utilização de cluster para agrupamento de espaços semelhantes mostrado por Agarwal e Roth (2002).	42
3.6	Resultado da detecção de veículos mostrada por Schneiderman (2000).	43
3.7	Imagens utilizadas por Carvalho et al. (1998) mostrando pontos de referência e depois estimando a distância entre dois pontos de seu interesse.	44
3.8	(a) imagem original. (b-d) a medida baseada na homografia calculada a partir dos pontos marcados com asterisco preto. Imagens utilizadas por Criminisi et al. (1997) mostrando pontos de referência e depois estimando a distância entre dois pontos de seu interesse.	45
3.9	As imagens representam o resultado da detecção de veículos em movimento conforme apresentado por Silva (2006).	46
4.1	Representação esquemática dos módulos da metodologia desenvolvida para detecção de espaço livre em regiões densamente ocupadas. Dividida em quatro módulos realizados respectivamente como apresentado: aquisição de imagens, detecção de vagas utilizando detector de características e por fim a utilização da homografia e visão estéreo para estimativa da distância.	48
4.2	Representação geométrica do processo de triangulação, mostrando equações que relacionam os sistemas de referência das câmeras e a construção através de triangulação, respectivamente.	57

5.1	Estas são imagens capturadas do modelo sintético. Aquisição de imagens sintéticas alterando-se a o posicionamento da câmera, ou seja, alterando-se a rotação e translação da câmera.	61
5.2	Configuração 1 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.	62
5.3	Configuração 2 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.	63
5.4	Configuração 3 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.	63
5.5	Configuração 1 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.	64
5.6	Configuração 2 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.	64
5.7	Configuração 3 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.	65
5.8	Gráfico representando a robustez da metodologia de detecção de espaço livre em relação a variação da escala da imagem. Também podendo ser interpretada como a alteração da rotação e translação da câmera distanciando-se do plano da cena. O eixo x são as variações de escala e o eixo y o erro da metodologia de detecção de espaço livre.	66
5.9	A imagem (a) é a imagem original. E as imagens de (b) a (f) são as imagens com os respectivos ruídos <i>gaussiano</i> , 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 e 0.05.	68

- 5.10 Esta imagem mostra as distâncias estimadas utilizando-se a matriz de homografia H utilizando apenas uma imagem. Utilizou-se diretamente a homografia entre plano da imagem e plano na cena para a estimação de pontos no mundo. 70
- 5.11 Esta imagem mostra a comparação entre as distâncias estimadas utilizando-se a matriz de homografia H direta entre plano da cena/projeção da imagem e distância real. 72
- 5.12 Estas foram as imagens utilizadas para realização do sistemas estéreo. A imagem (a) é a imagem do lado esquerdo e a imagem (b) é a imagem do lado direito do sistema estéreo. 73
- 5.13 Esta imagem mostra quais as áreas podem ser ocupadas com base nas distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente. 74
- 5.14 Esta imagem mostra as áreas que podem ser ocupadas com base nas distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo utilizando a homografia entre as imagens para estimação dos pontos correspondentes. 74
- 5.15 Essas imagens fazem uma comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando homografia para os pontos correspondentes. A imagem a direita compara as distâncias estimadas com pontos correspondentes selecionados manualmente. . . . 76
- 5.16 Esta figura mostra as imagens utilizadas para realização do sistema estéreo. A imagem a esquerda é a imagem do lado esquerdo do par estéreo e a imagem a direita é a imagem do lado direito do par estéreo. 77
- 5.17 Esta imagem mostra as distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com longo *baseline*. 78
- 5.18 A imagem mostra as distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com homografia para estimação dos pontos correspondentes para o cálculo da triangulação. 78

5.19	Essas imagens fazem uma comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando homografia para os pontos correspondentes. A imagem a direita compara as distâncias estimadas com pontos correspondentes selecionados manualmente. . . .	80
5.20	Este gráfico realiza uma comparação entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. Foram utilizadas as distâncias da mesma região na cena com todas as 11 distâncias estimadas.	81
5.21	Imagem capturada da para detecção de vagas utilizando <i>corner detection</i>	83
5.22	Esta imagem mostra o arcabouço experimental do modelo controlado em escala. O piso deste modelo, ou seja, as faixas e a cor do asfalto foram impresso em uma folha de tamanho A2 utilizando uma menor escala do modelo sintético desenvolvido.	84
5.23	Resultado da detecção de veículos utilizando o detector de características nas regiões de interesse. O resultado mostra com sucesso a detecção de espaço livre.	85
5.24	Resultado da detecção de veículos utilizando detector de características nas regiões de interesse. Com boa taxa de acerto.	87
5.25	Resultado da detecção de veículos utilizando detector de características nas regiões de interesse. Com boa taxa de acerto.	88
5.26	A imagem mostra as distâncias estimadas na cena entre regiões/pontos definidos manualmente na imagem.	90
5.27	A imagem mostra a comparação das distâncias estimadas na cena entre regiões/pontos definidos manualmente e distâncias reais utilizando a homografia.	92
5.28	Esta figura mostra o par de imagens estéreo utilizado para obtenção das distâncias na cena. A imagem a direita é a imagem do lado esquerdo e a imagem a esquerda é a imagem do lado direito do sistema estéreo.	94

- 5.29 A imagem mostra as distâncias estimadas em seus respectivos pontos de correspondência selecionados manualmente para o processo de triangulação. 95
- 5.30 A imagem mostra as distâncias estimadas utilizando a homografia entre as imagens para os pontos correspondentes utilizados no processo de triangulação. 95
- 5.31 Mostra a comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens. A imagem a direita compara as distâncias com os pontos correspondentes selecionados manualmente. . . 98
- 5.32 Este gráfico realiza uma comparação entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. Foram utilizadas as distâncias da mesma região na cena com todas as 11 distâncias estimadas. 100
- 5.33 Imagem da cena do mundo real onde foram capturadas as imagens para a avaliação operacional tanto utilizando o detector de características para detecção de espaço livre, como também utilizando as técnicas de estimação de distâncias. 102
- 5.34 Imagem de entrada para a metodologia de detecção de vagas utilizando o detector de característica com os seus parâmetros padrão. 103
- 5.35 Resultado da metodologia de detecção de vagas utilizando a metodologia de detecção de espaço livre com detector de característica com os parâmetros padrão. 104
- 5.36 As imagens de (a) a (c) são as imagens de entrada para a metodologia de detecção de vagas utilizando o detector de espaço livre com detector de característica sem alteração em seus parâmetros. 105
- 5.37 As imagens de (a) a (c) são os resultados das imagens de entrada das Figuras 5.36 utilizando a metodologia de detecção de vagas com a utilização do detector de característica alterando-se o limiar = 200. 106

5.38	Distâncias estimadas utilizando-se a matriz de homografia . .	108
5.39	Mostra uma comparação entre as distâncias estimadas utilizando a homografia e a distâncias reais adquiridas por medição na cena.	109
5.40	As imagens foram utilizadas para determinação do sistema estéreo. A imagem (a) é a imagem do lado esquerdo e a imagem (b) é a imagem do lado direito do sistema estéreo.	111
5.41	Distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo de cena real. .	112
5.42	Distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com homografia para estimação dos pontos correspondentes.	112
5.43	Mostra a comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens. A imagem a direita compara as distâncias com os pontos correspondentes selecionados manualmente. . .	114
5.44	Este gráfico realiza uma comparação entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. Foram utilizadas as distâncias da mesma região na cena com todas as 5 distâncias estimadas.	117

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que se não fosse a vontade Dele, eu não teria chegado até aqui. Obrigado Senhor pelas bênçãos concedidas a mim.

Agradeço aos meus pais que me incentivaram, educaram e acreditaram que eu conseguiria alcançar esse objetivo. Obrigado pai (Douglas Brasil) e mãe (Cleonice Bandeira Brasil). Amo vocês.

Agradeço a minha noiva, logo logo esposa, Natália Carolina Monteiro Torres pela motivação e pelas horas me ajudando nas atividades que não podia realizar porque estava estudando. Amo você naty. Deus continue a nos abençoar ricamente em nome de Jesus.

Agradeço ao professor e orientador José Luiz de Souza Pio que me ensinou e orientou durante o mestrado.

Agradeço ao CNPq pelo investimento feito durante o período de mestrado e ao projeto.

Agradeço aos amigos que estiveram comigo nesta caminhada. Obrigado Geraldo Pereira da Silva Filho, Ícaro Oliveira de Oliveira, Frederico (Fred), Felipe Gomes, Francisca Sancha, Daniel Duhau e tantos outros que direta ou indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. Obrigado pessoal.

Resumo

Este trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia de detecção de espaço livre em regiões densamente ocupadas utilizando a geometria da cena e múltiplas câmeras. Utilizou-se três maneiras para detecção de espaço livre: utilizando um detector de características sob regiões predefinidas, homografia entre imagem e cena, e por fim, a visão estéreo. Este trabalho está contextualizado em uma aplicação para detecção e estimação de vagas em estacionamentos. Foram obtidos resultados com aceitável variação do erro para um intervalo de confiança de 90 % para as estimações das distâncias e também alta taxa de acerto utilizando a metodologia de detecção de vagas.

Palavras-chave: homografia, visão estéreo, *corner detection*, vagas em estacionamento.

Abstract

This work develop a methodology to detention of free space in densely busy regions using the geometry of the scene and multiple cameras. We use three ways for detention of free space: the characteristics detector, homography between image plan e scene plan, and finally, stereo vision. This work is context of the a application to detection and estimate of free parking. The results have acceptable variation of the error for a reliable interval of 90 % to estimate of distances and high tax of rightness using the methodology of vacant detention.

Keywords: homography, stereo vision, corner detection, free vacant detention.

Capítulo 1

Introdução

O problema abordado neste trabalho é a detecção de espaço livre em regiões densamente ocupadas por objetos rígidos a partir de imagens obtidas por sensores visuais convenientemente distribuídos. Problemas da mesma natureza são comuns em estacionamentos de shoppings, aeroportos, centros econômicos, políticos, agências militares, estádios de futebol, ginásios poliesportivos, museus, universidades, bibliotecas, zoológicos, parques temáticos entre outros.

Neste trabalho, este problema é contextualizado em uma aplicação prática que consiste na determinação de vagas em grandes áreas de estacionamentos a partir de informação visual obtida por câmeras com sobreposição de campo de visão de um sistema de circuito fechado de TV (CFTV).

Atualmente é comum o uso de câmeras para monitorar grandes parques de estacionamento. Essas câmeras, geralmente organizadas em um circuito fechado de TV (CFTV) que fornecem uma quantidade enorme de informação visual que não é utilizada. A análise das cenas e eventos que ocorrem nesses parques é feita, em geral, após a ocorrência por um operador humano.

A proposta deste trabalho está assentada no uso inteligente da informação visual provida pelo sistema câmeras. Por meio da abordagem desenvolvida se pode, por exemplo, indicar o local mais próximo para alguém que procure vaga em grandes estacionamentos.

Isso atenua a tediosa tarefa de procurar vagas para estacionar em grandes eventos. O que tem sido uma tarefa árdua enfrentada por qualquer pessoa que necessite encontrar um local seguro para seu veículo.

A abordagem desenvolvida está assentada na hipótese de que: *A detecção de vagas livres em um espaço geometricamente definido pode ser obtida por meio de uma transformação projetiva (ou homografia) entre o espaço planar das vagas e o plano de projeção das câmeras.*

A idéia geral é operacionalizar a maneira como o ser humano realiza essa tarefa. Primeiramente, detecta a presença de vaga e intrinsecamente realiza cálculos e estima se há distância, entre veículos ou pontos-chaves da área de estacionamento, para que possa estacionar seu automóvel.

Este problema está relacionado com a área de visão computacional. Essa tem como principal objeto de estudo a interpretação de imagens, estimando e reconstruindo a geometria e propriedades dinâmicas do mundo tridimensional a partir de imagens digitais (Trucco e Verri, 1998). Para isso, inclui dispositivos de hardware para aquisição, armazenamento, processamento de imagens digitais e a comunicação do resultado ao usuário.

Nossa abordagem está dividida metodologicamente em duas partes. A primeira parte é a detecção de objetos em imagens de parques de estacionamento. Utilizando a técnica conhecida como detecção de pontos de interesse pode-se verificar a presença de objetos em imagens. Assim, a idéia é verificar a presença de automóveis considerando apenas os pontos de interesse que estejam acima de um limiar previamente estabelecido nas regiões de interesse.

A segunda parte da metodologia, consiste em estimar a distância entre os pontos de interesse das imagens após sua transformação projetiva, aproximando-se ao máximo da distância real entre os objetos. Nesta parte, várias imagens são adquiridas por câmeras convenientemente distribuídas com sobreposição em seu campo de visão. Em cada imagem são observados os pontos que servirão como referência para geração de uma função que

estimar a posição tridimensional correspondente aos pontos de interesse detectados nas imagens.

A utilização prática da metodologia contribui para o controle, organização, e fiscalização de automóveis em estacionamento. A metodologia elaborada permite não somente a verificação da presença ou ausência de automóveis em imagens, como também expande a maneira de detecção das vagas não ocupadas em estacionamento, estimando a distância entre automóveis adjacentes, ou entre pontos-chaves da área de estacionamento.

A principal contribuição deste trabalho é a ampliação da capacidade de obtenção de informações movida pela rede de câmeras. Permite-se, determinar distâncias, avaliar espaços e estimar posições para o estacionamento de veículos.

1.1 Motivação

Vários foram os motivos que estimularam o desenvolvimento desta dissertação. Primeiro, *a aplicação e o contato direto a grande parte da sociedade*. Como já mencionado, são diversos os lugares que têm em comum a elevada aglomeração de pessoas. Um fato diretamente relacionado é o uso do automóvel como meio habitual de locomoção para esses locais. Portanto, acredita-se na ampla utilização de uma metodologia que permita de maneira rápida e precisa responder: qual a quantidade e localidade de automóveis e vagas não ocupadas nos estacionamentos de tais lugares?.

O segundo principal motivo, *a escassez de profissionais que atuam na área de visão computacional desenvolvendo soluções tanto no âmbito social quanto comercial ou industrial*. A dinamicidade do mundo moderno excita a cobiça por soluções cada vez mais práticas, eficientes e automáticas. Entretanto, a carência de profissionais da área de robótica, visão computacional, prejudica não só o desenvolvimento tecnológico local, regional e nacional, como também à economia e à inclusão social a tecnologias.

Um terceiro motivo, *a concessão do amadurecimento acadêmico, fomentando à elaboração, concepção de um trabalho de doutorado na área de robótica*. O bom desempenho durante o processo de criação de um trabalho de doutorado é alcançado graças a este primeiro contado direto com a elaboração, elucubração e exercício de leis, teorias, métodos e técnicas relacionados à área de pesquisa no mestrado.

E por fim, *a geração de capital intelectual*. Criar, desenvolver, produzir, ensinar e aprimorar são algumas das características dos indivíduos que detêm profundo conhecimento de determinada área científica. Com isso, confia-se que o aumento do número de pessoas com essas características possa contribuir de maneira positiva com a geração de emprego; qualidade de vida e educação; criação tecnológica; competitividade econômica, tecnológica etc.

Portanto, o desenvolvimento desta dissertação teve como premissa melhorar às condições de vida, tanto no âmbito social, organizacional, educacional quanto comercial. E por fim, o desejo de vencer, triunfar as dificuldades, desafios foram também essenciais para o desenvolvimento desta dissertação.

1.2 Justificativa

O uso inteligente das redes de câmeras foi a principal causa para a elaboração desta metodologia. Como já explanado na introdução, são diversos os locais que necessitam de imensos parques para o estacionamento de automóveis. O crescimento populacional; a modernização; a facilitação para compra de automóveis; a criação e centralização de instituições que concentram pessoas, direta ou indiretamente, para atividades afins foram alguns dos motivos considerados para a escolha e desenvolvimento desta dissertação.

A infra-estrutura das grandes entidades econômicas, políticas, militares, educacionais, esportivas e culturais são alguns exemplos de locais que utilizam rede de câmeras, não a aproveitando de maneira inteligente. Por exemplo, ter controle do número de vagas, livres e ocupadas, da ampla área de

seus estacionamentos é de fundamental importância, tanto para os clientes, proporcionando comodidade, quanto para o estabelecimento, tendo informação precisa da ocupação do estacionamento em determinado momento, decidindo à entrada ou não de outros automóveis. Com essa metodologia, há garantia que veículos possam ser estacionados.

A metodologia aqui elaborada permite não somente a verificação da presença ou ausência de automóveis em imagens, mas também amplia a capacidade do sistema de detecção das vagas não ocupadas em estacionamento, estimando a distância real entre automóveis adjacentes, ou entre automóveis e pontos-chaves da área de estacionamento. Torna possível o controle confiável, permitindo a entrada, ou não, dos automóveis no estacionamento, conforme capacidade informada pelo sistema.

Já do ponto de vista teórico, obtém a geometria da cena a partir da informação visual. Ponto de interesse, dados geométrico da cena e transformação projetiva, que permitem estimar pontos tridimensionais a partir da imagem, podem ser ampliados possibilitando a aplicação em outros contextos.

Este trabalho justifica-se por possibilitar o controle de grandes estacionamentos. Fornece eficiência e comodidade tanto para quem procura por vaga em estacionamentos, como para o estabelecimento, dando informações precisas resultantes desta metodologia. Permite não somente a organização do estacionamento como também evita o tráfego desnecessário de veículos no local.

1.3 Objetivo

Para melhor compreensão, os objetivos foram divididos em geral e específicos. Objetivo geral, apontando o propósito maior do trabalho e o resultado final a ser alcançado. E os objetivos específicos, de caráter mais concreto e experimental, especificando as etapas cumpridas.

1.3.1 Geral

O objetivo geral é desenvolver uma metodologia capaz de detectar espaço livre estimando a estrutura geométrica desse espaço, provendo assim, uma maneira de se determinar locais livres para estacionamento, facilitando a tediosa tarefa de procurar por vagas em grandes parques.

1.3.2 Específicos

Os principais objetivos específicos são os seguintes:

- Avaliar a robustez da metodologia sob diversas condições de iluminosidade e ruído;
- Montar aparato experimental para a validação dos resultados teóricos;
- Desenvolver experimentos sob diversas condições de controle e em ambiente sintético para fins de validação da teoria.

1.4 Organização do Texto

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. No Capítulo 1, fez-se uma breve introdução sobre o problema abordado delimitando o tema, descrevendo de maneira simplória a área de pesquisa e processo de experimentação. Foi neste capítulo que pontos fundamentais de um texto científico foram apresentados. Foi dada uma visão geral do trabalho, citando por exemplo, a definição do problema, contextualização, hipótese primária, metodologia, contribuições e principais trabalhos relacionados.

No Capítulo 2, faz-se a descrição dos fundamentos teóricos relevantes utilizados para desenvolvimento desta dissertação. Definição de conceitos e idéia geral sobre transformação projetiva, pontos de interesse, detecção de objetos e alguns conceitos fundamentais relacionados à visão computacional são descritos facilitando o entendimento da fase de experimentação.

No Capítulo 3, mostra uma combinação da visão geral dos trabalhos relacionados e sua análise crítica, apontando vantagens e principalmente as desvantagens das técnicas e metodologia utilizadas. É neste capítulo que são apresentados alguns pontos chave, considerados dos trabalhos relacionados, que combinados ou aprimorados deram origem a esta dissertação.

No Capítulo 4, descreve-se os caminhos metodológicos utilizados para a condução do trabalho, apresentado na seqüência cronológica em que o mesmo é desenvolvido. Contendo as seguintes informações: a especificação do problema, apresentação de hipóteses, a caracterização do estudo, tipo de pesquisa, abordagem, a descrição das técnicas de tratamento, análise e interpretação dos dados.

No Capítulo 5, faz-se a descrição detalhada dos experimentos realizados. O objetivo deste capítulo, além de expor passo a passo as atividades de cada experimento, é também explicar experimentalmente os "porques" de algumas decisões de desenvolvimento.

E por fim, no Capítulo 6, é realizada a conclusão deste trabalho e exposição de algumas novas idéias que estimulam o desenvolvimento de trabalhos, os quais expandem, aperfeiçoam sistemas de controle automático de estacionamentos.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo apresentam-se fundamentos teóricos de visão computacional utilizados neste trabalho. O objetivo é o esclarecimento de conceitos, métodos e técnicas importantes utilizados no seu desenvolvimento. Defini-se seu objeto de estudo, princípios fundamentais e especificamente visão estéreo, ponto de interesse e transformação projetiva (homografia).

2.1 Informação Tridimensional

2.1.1 Conceitos Gerais

Um dos objetivos da visão por computador é adicionar as máquinas capacidade sensoriais, de maneira que possam realizar tarefas que lhe são atribuídas com certo grau de autonomia (Silva, 1994). Uma das mais importantes capacidades sensoriais é a determinação da estrutura tridimensional de uma cena, visto que no mundo real os objetos são fundamentalmente tridimensionais.

Silva (1994) apresenta diferentes formas de classificação sobre técnicas de aquisição de informação tridimensional. A mais comum é a divisão em técnicas passivas e ativas. As técnicas passivas caracterizam-se por apenas utilizarem a luz ambiente para iluminar a cena. Onde a informação de distância é adquirida a partir de uma ou mais imagens de intensidade da cena.

Entre as técnicas passivas, a mais conhecida é a *estereoscopia*, que permite obter informação de distância a partir de duas imagens de intensidade da cena, obtidas com câmeras colocadas em posições diferentes, recorrendo ao princípio da triangulação.

Já as técnicas ativas caracterizam-se pela projeção direta de energia sobre a cena. Geralmente sob forma de luz ou ultrasons. A energia refletida é detectada em sensores que de maneira mais ou menos direta, fornecem a informação de distância.

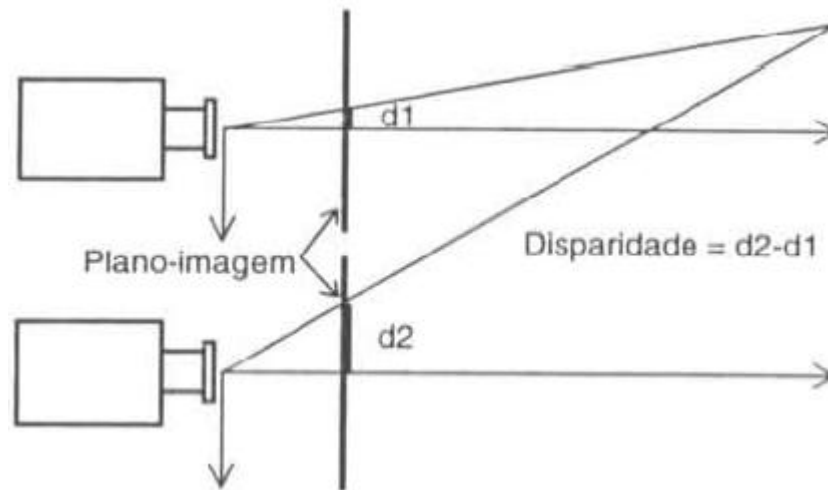


Figura 2.1: Ilustração do conceito de disparidade

Esta dissertação, assim como apresentado por Silva (1994), utiliza a *estereoscopia passiva* motivada pelo fato de a percepção de distância no sistema visual humano resultar principalmente de um processo que opera sobre duas imagens chamado *fusão* ou *disparidade* (ver Figura 2.1).

Resumidamente, a *estereoscopia passiva* recorre a duas imagens de uma cena, tomada de posições diferentes, para obter informação de distância. O processo de medida de distância por *estereoscopia passiva*, como descrito em Silva (1994), pode ser dividido nos seguintes passos:

1. Adquirir duas imagens da cena, tomadas de pontos diferentes e de modo que exista alguma sobreposição entre elas;
2. Estabelecer correspondência entre pontos das duas imagens, ou seja, encontrar pares de pontos que sejam a projeção do mesmo ponto na cena;
3. E por fim, para cada par de pontos correspondentes determinar o ponto de interseção das retas por eles determinadas no espaço, obtendo desta maneira as coordenadas do ponto da cena, processo conhecido como *triangulação*.

A seguir apresenta-se de maneira detalhada a *estereoscopia* ou *visão estéreo*.

2.1.2 Visão Estéreo

A visão estéreo é a habilidade de inferir informações e distâncias a partir de duas ou mais imagens tomadas de pontos de vista distintos sobre a mesma cena (Trucco e Verri, 1998). De modo geral, o sistema estéreo deve solucionar dois problemas. O primeiro problema consiste em determinar os itens correspondentes nas imagens (para mais detalhes ver em Trucco e Verri (1998)). E o segundo problema consiste na reconstrução tridimensional.

Trucco e Verri (1998) diz que a percepção humana de mundo tridimensional é devido a interpretação que o cérebro realiza através do cálculo da diferença na posição da retina, também conhecido como *disparidade* entre itens correspondentes. A *disparidade* de todos os pontos forma o chamado *mapa de disparidade* que pode ser exibido como imagem.

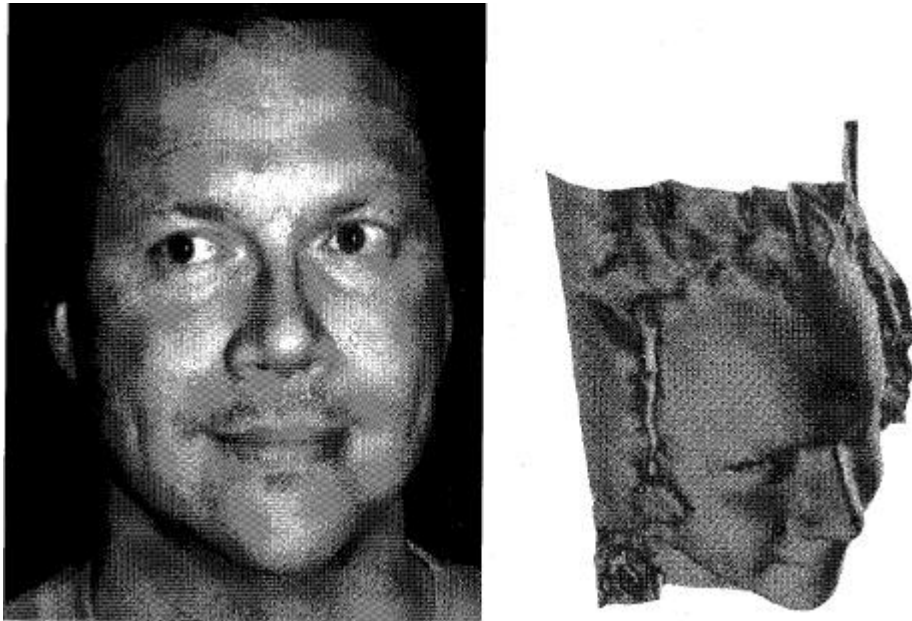


Figura 2.2: Imagem a esquerda é uma das imagens do par estéreo da face de Emanuele Trucco. A Imagem da direita é a reconstrução tridimensional (Trucco e Verri, 1998)

Se a geometria do sistema estéreo é conhecida, o mapa de disparidade pode ser convertido para um mapa tridimensional da cena (a reconstrução), conforme exibido por Trucco e Verri (1998) (figure 2.2)

Sistema Estéreo Simples

Em Trucco e Verri (1998) tem-se um simples sistema estéreo. A Figura 2.3 ilustra o sistema estéreo de duas câmeras *pinhole* visto de cima.

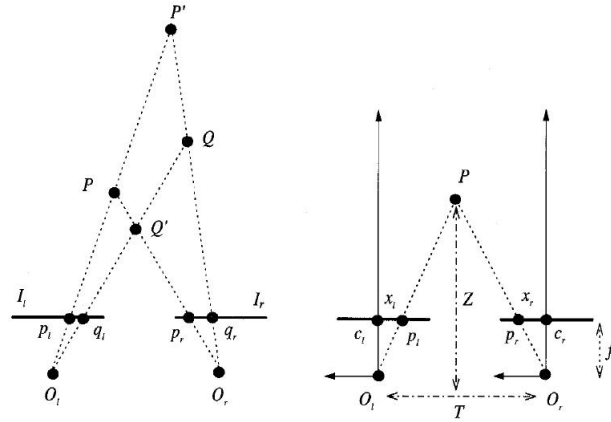


Figura 2.3: Importante lembrar que neste simples sistema estéreo a reconstrução depende da solução do problema de correspondência. A profundidade do sistema da esquerda é estimada a partir da disparidade dos pontos correspondentes do sistema da direita. (Trucco e Verri, 1998)

Os planos das imagens da esquerda e direita são coplanares e representadas pelo segmento I_l e I_r respectivamente. O_l e O_r são o centro de projeção. E os eixos ópticos são paralelos, e por isso, o *ponto de fixação*, definido como o ponto de interseção dos eixos ópticos, dão a sensação de estarem infinitamente distante das câmeras.

Uma maneira de utilizando a visão estéreo determinar a posição no espaço de P e Q (Figura 2.3) é a *triangulação*, que é a interseção das linhas definidas pelo centro de projeção e as imagens de P e Q , p_l , p_r , q_l , q_r .

A triangulação depende da solução do problema de correspondências: Trucco e Verri (1998) mostra que se (p_l, p_r) e (q_l, q_r) são pontos correspondentes na imagens, a interseção das linhas $O_l p_l - O_r p_r$ e $O_l q_l - O_r q_r$, leva a interpretação de projeção de P e Q . Mas, se (p_l, q_r) e (q_l, p_r) forem selecionados como pontos correspondentes, a triangulação retornará P' e Q' . Portanto, note-se

a importância da correta seleção dos pontos correspondentes, que é explicado detalhadamente em Trucco e Verri (1998).

Trucco e Verri (1998) concentra-se na descoberta da posição de um simples ponto P , a partir das projeções, p_l e p_r (Figura 2.3 a direita). A distância T , entre os centros ópticos O_l e O_r , é conhecida como *baseline* do sistema estéreo. Diz-se que x_l e x_r são as coordenadas de p_l e p_r com relação aos pontos principais c_l e c_r , f a distância focal e Z a distância entre P e o *baseline*. A partir de semelhança de triângulos (p_l, P, p_r) e (O_l, P, O_r) , tem-se

$$\frac{T + x_l - x_r}{Z - f} = \frac{T}{Z} \quad (2.1)$$

Isolando Z na equação 2.1 tem-se

$$Z = f \frac{T}{d}, \quad (2.2)$$

onde $d = x_l - x_r$ é a *disparidade*, que é a medida de diferença entre a diferença da posição na retina dos pontos correspondentes nas duas imagens.

Parâmetros do Sistema Estéreo

No simples exemplo de sistema estéreo observa-se a dependência da distância focal, f , *baseline*, T , as coordenadas x_l e x_r em relação aos pontos principais c_l e c_r . As variáveis f , T , c_l , c_r são os *parâmetros do sistema estéreo*, e encontrá-los são o problema da *calibração estéreo*.

Geralmente existem dois tipos de parâmetros de calibração no sistema estéreo: *parâmetros intrínsecos* - caracterizado em transformar um ponto de imagem da câmera para coordenadas de *pixel* em cada câmera. E os *parâmetros extrínsecos* - descreve a posição e orientação relativa das duas câmeras.

Para uma explicação mais profunda sobre parâmetros intrínsecos ler capítulo 2 em Trucco e Verri (1998). Simploriamente pode-se dizer que os parâmet-

ros intrínsecos incluem as coordenadas do ponto principal e o comprimento focal (distância focal) em pixel. Já os parâmetros extrínsecos por exemplo, diferente do que diz Trucco e Verri (1998) no capítulo 2, descreve as transformações de rotação e translação dos sistemas de referências de ambas as câmeras que estão sobre um sistema de referência do mundo.

Geometria Epipolar e Retificação Estéreo

Nogueira (1998); Trucco e Verri (1998) descreve sobre a geometria epipolar presente no par de imagens de *estereoscopia* com relação ao fato que um ponto no espaço objeto, P , a projeção deste ponto na câmera da esquerda e na câmera da direita, assim como os centros perspectivos de ambas as câmeras são **coplanares** (ver Figura 2.4).

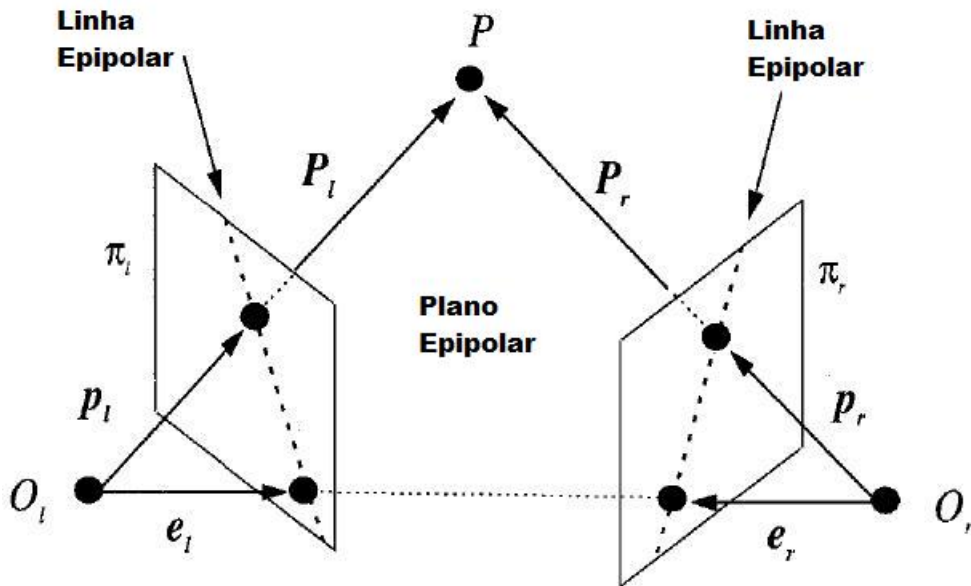


Figura 2.4: Retificação de um par estéreo. As linhas epipolares associadas ao ponto tridimensional, P estão destacadas de cor mais escura. As linhas epipolares das imagens retificadas de cor mais clara. (Trucco e Verri, 1998)

Tal injunção de coplanaridade dos faz com que dado um ponto em uma imagem, seu ponto homólogo esteja necessariamente sobre uma linha na out-ras imagem. Está linha em denominada linha epipolar e o plano formado por tais pontos é denominado plano epipolar.

Dado um par de imagens, a retificação determina uma transformação (ou distorção) de cada imagem onde cada par de linhas epipolares tornam-se colineares e seu eixos ópticos paralelos, conforme Figura 2.5 (ver detalhes em Trucco e Verri (1998)).

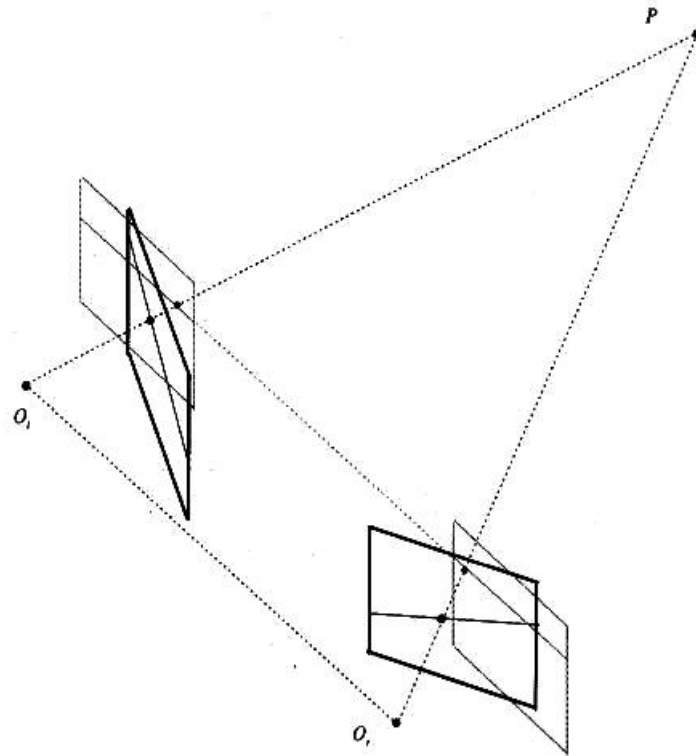


Figura 2.5: Ilustração da retificação de imagens. Cada par de linhas de cada imagem tornam-se epipolares, colineares e eixos ópticos paralelos (Trucco e Verri, 1998)

2.2 Pontos de Interesse

Encontrar características marcantes que representem alvos ou objetos presentes em imagens é um problema complexo. Diversos são os métodos propostos com tal objetivo. Esta dissertação utiliza uma técnica clássica conhecida como *Harris Corner Detector*, utilizado para detectar *ponto de interesse*.

Harris Corner Detector é um popular detector de pontos de interesse devido a sua forte invariância em relação a rotação, escala, iluminação e ruído de imagens. Ele é baseado na função de autocorrelação do local indicado. Onde a função de autorrelação local mede a mudança local em diferentes direções (ver C. Schmid e Bauckhage (2000)).

Harris Corner Detection, baseado na função de autocorrelação local nas diversas direções de cada ponto. Derpanis (2004) mostra que a detecção ou não de pontos de interesse está restrita a três casos específicos de variações de sinais dos *autovalores* λ_1 , λ_2 da matriz de autocorrelação sobre a janela especificada, com ponto central (x, y) .

Primeiro, quando ambos autovalores são baixos. Significando que a região com ponto central (x, y) não possui ponto de interesse, porque não foi detectada variação significativa de intensidade na área analisada.

Segundo, quando os autovalores possuem sinais opostos. Indicando a detecção de bordas na região analisada. E por fim, quando os autovalores possuem ambos sinais elevados, indicando a detecção de *corners* (extremidades ou cantos).

Tendo-se uma variação $(\Delta x, \Delta y)$ e ponto central (x, y) , a função de autocorrelação é definida como em Derpanis (2004),

$$c(x, y) = \Sigma_W [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2 \quad (2.3)$$

onde I representa a imagem e (x_i, y_i) são os pontos na janela W (Gaussian) centralizado em (x, y) .

Para um estudo mais detalhado sobre *Harris Corner Detector* ler Harris (1988), Derpanis (2004) e C. Schmid e Bauckhage (2000).

2.3 Geometria Projetiva

A *geometria projetiva* é um tipo bem diferente de geometria e possui importantes, mas menos óbvias aplicações. A geometria projetiva foi descoberta através do esforço dos artistas no decorrer dos séculos em busca da representação em suas pinturas de cenas compostas de objetos que estão em diferentes distâncias com relação aos olhos.

A pergunta é: *como representar um cena tridimensional em uma tela bidimensional?* A geometria projetiva explica como um olho percebe o mundo real, e então explica como os artistas fizeram para alcançar tal realidade em seus trabalhos (ver em Brunnan (1998)).

Brunnan (1998) apresenta o desenvolvimento artístico sobre *perspectiva*, o conceito de *perspectividade*, a descrição do teorema de *Desargues*, o qual se concentra em uma propriedade interessante entre dois triângulos com vértices em visão perspectiva a partir de um mesmo ponto. Realiza também a prova matemática sobre os conceitos de perspectiva.

Parte fundamental da geometria perspectiva são suas transformações. Na próxima seção descreve-se de maneira sucinta a *homografia* ou *transformação projetiva*.

2.3.1 Homografia ou Transformação Projetiva

Nesta seção considera-se o problema de estimação. No presente contexto de computação pode-se dizer que estimar consiste em transformações ou

matemática quantitativa, baseadas em medidas de alguma natureza, neste caso a distância.

A definição, citada acima, é bastante ampla. Assim, alguns problemas de estimação que esclarecem tal conceito são:

- *Homografia bidimensional* - onde, dado um conjunto de pontos x_i no R^2 e o conjunto de pontos correspondentes x'_i também no R^2 , calcula a transformação projetiva de cada ponto x_i para x'_i . Uma situação prática, os pontos x_i e x'_i são pontos em duas imagens (ou na mesma imagem), cada imagem é considerada como uma projeção plana R^2 .
- *Projeção 3D para 2D* - dado um conjunto de pontos X_i no espaço tridimensional, e um conjunto de pontos correspondentes x_i em uma imagem, encontre o mapa de projeção de 3D para 2D que mapeia X_i para x_i .

Todos as situações acima possuem características em comum, dar-se-á mais detalhes sobre homografia 2D porque é de fundamental importância para solução dos demais problemas, sendo também utilizado na metodologia desta dissertação.

Considera-se um conjunto de pontos correspondentes $x_i \leftrightarrow x'_i$ entre duas imagens. O problema é calcular a matriz H (3×3) que $Hx_i = x'_i$ para cada i .

Medidas Necessárias - Primeiramente, questiona-se quantos pontos $x_i \leftrightarrow x'_i$ são necessários para calcular a transformação projetiva H (Figura 2.6). O limite mais baixo é vantajoso levando em consideração o número de graus de liberdade e número de restrições. Por um lado, a matriz H possui 9 elementos, mas é definida apenas sobre escalar.

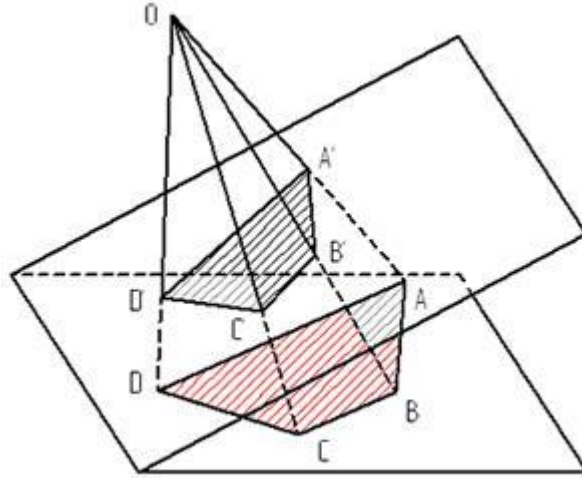


Figura 2.6: Representação geométrica da homografia H . Representa a homografia H , que mapeia dois planos através de pontos correspondentes entre planos não paralelos.

Embora, o número total de graus de liberdade na transformação projetiva bidimensional seja 8. Por outro lado, cada ponto correspondente representa duas restrições, visto que para cada ponto x_i na primeira imagem, dois graus de liberdade do ponto na segunda imagem devem corresponder para mapear o ponto Hx_i . Um ponto bidimensional tem dois graus de liberdade correspondentes para os componentes x e y , cada qual podendo ser especificado separadamente.

Sendo assim, o ponto é especificado como um vetor de tamanho três em coordenadas homogêneas, que também tem dois graus de liberdade visto que a escala é arbitrária. Como consequência, é necessário especificar quatro pontos correspondentes para forçar obtenção completa de H .

Soluções aproximadas - Observa-se que se exatos quatro pontos correspondentes são dados, então é possível uma solução exata para a matriz H , sendo esta a solução minimizada. Tais soluções são importantes porque o

modo como definem o tamanho do subgrupo requer algoritmos robustos de estimação, como **RANSAC**.

De qualquer forma, visto que pontos são medidas inexatas, se mais de quatro pontos correspondentes forem dados, então essa correspondência pode não ser completamente compatível com alguma transformação projetiva, e uma estará frente a que determinará a "melhor" transformação dado os dados. Isso será geralmente feito buscando a transformação H que minimize a função de custo. Existem diferentes funções de custo e seus respectivos métodos de minimização. Existem duas principais classes de funções de custo: as baseadas na minimização algébrica do erro e as baseadas na minimização da distância geométrica ou estatística, explicado detalhadamente em Sivic e Zisserman (2003).

Algoritmo de *Transformação Linear Direta*

O algoritmo de transformação linear (*Direct Linear Transformation - DLT*) é um simples algoritmo linear para determinar a homografia H dado um conjunto de pontos bidimensionais correspondentes, $x_i \leftrightarrow x'_i$ (Hartley (2004)). A transformação é dada pela equação $x'_i = Hx_i$. Observamos que essa equação envolve vetores homogêneos. Mesmo os vetores tridimensional x'_i e Hx_i não sendo iguais, eles possuem mesma direção, mas podem ser diferentes na magnitude por um fator escalar diferente de zero. A equação pode ser mostrada em termos de produto de vetor como $x'_i \times Hx_i = 0$. Esta forma torna possível a solução linear para H ser derivada.

Se a j -ésima linha da matriz H é denotada por \mathbf{h}^{jT} sendo seus elementos, então pode-se escrever:

$$Hx_i = \begin{pmatrix} h^{1T}x_i \\ h^{2T}x_i \\ h^{3T}x_i \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Escrevendo $\mathbf{x}'_i = (x'_i, y'_i, w'_i)$, o produto pode então ser dado explicitamente como

$$\mathbf{x}'_i \times \mathbf{H}\mathbf{x}_i = \begin{pmatrix} y'_i h^{3T} \mathbf{x}_i & -w'_i h^{2T} \mathbf{x}_i \\ w'_i h^{1T} \mathbf{x}_i & -x'_i h^{3T} \mathbf{x}_i \\ x'_i h^{2T} \mathbf{x}_i & -y'_i h^{1T} \mathbf{x}_i \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Visto que $\mathbf{h}^{jT} \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i^T \mathbf{h}^j$ para $j = 1, \dots, 3$, os quais formam o conjunto de três equações em \mathbf{H} , que podem ser escritas na seguinte forma

$$\begin{bmatrix} 0^T & -w'_i \mathbf{x}_i^T & y'_i \mathbf{x}_i^T \\ w'_i \mathbf{x}_i^T & 0^T & x'_i \mathbf{x}_i^T \\ -y'_i \mathbf{x}_i^T & x'_i \mathbf{x}_i^T & 0^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{h}^1 \\ \mathbf{h}^2 \\ \mathbf{h}^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.6)$$

Estas equações tem a forma $\mathbf{A}_i \mathbf{h} = 0$, onde \mathbf{A}_i é uma matriz 3×9 e \mathbf{h} é um vetor de 9 posições formado a partir da matriz \mathbf{H} ,

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} \mathbf{h}^1 \\ \mathbf{h}^2 \\ \mathbf{h}^3 \end{pmatrix} \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

com h_i o i -ésimo elemento de \mathbf{h} . Três observações sobre estas equações são consideradas.

- A equação $\mathbf{A}_i \mathbf{h} = 0$ é uma equação linear nas variáveis \mathbf{h} . Os elementos da matriz \mathbf{A}_i são quadráticos sobre as coordenadas dos pontos conhecidos.
- Embora existam três equações, apenas duas são linearmente independente (visto que a terceira linha é obtida, sobre um escalar, a partir da soma dos x'_i na primeira linha e dos y'_i na segunda linha). Assim, para cada ponto correspondente dado, são criadas duas equações para obtenção de \mathbf{H} . Segundo Hartley (2004), é comum a omissão da terceira equação para solução de \mathbf{H} .

Então, o conjunto de equações se transformam em

$$\begin{bmatrix} 0^T & -w'_i x_i^T & y'_i x_i^T \\ w'_i x_i^T & 0^T & x'_i x_i^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{h}^1 \\ \mathbf{h}^2 \\ \mathbf{h}^3 \end{pmatrix} = 0 \quad (2.8)$$

que será escrita como $\mathbf{A}_i \mathbf{h} = 0$, onde \mathbf{A}_i é agora uma matriz 2×9 . Se de qualquer forma um dos pontos \mathbf{x}'_i é um ponto ideal, então que $w'_i = 0$, então o par de equações acima oculta uma simples equação. Mesmo que no conjunto com as três equações, apenas duas equações sejam linearmente independentes, de qualquer maneira, neste caso, a terceira equação não deve ser omitida. É possível que incluindo todas as equações possa dar melhores condições para o conjunto de pontos.

- As equações organizam em coordenadas homogêneas com a representação (x'_i, y'_i, w'_i) do ponto \mathbf{x}'_i .

Solução de H

Para cada ponto correspondente dado, duas equações novas são adicionadas para solução de H. Dado um conjunto de quatro pontos correspondentes, pode-se obter um conjunto de equações $\mathbf{A} \mathbf{h} = 0$, onde \mathbf{A} é a matriz da equação dos coeficientes formado a partir das linhas de \mathbf{A}_i conforme cada ponto correspondente. E \mathbf{h} é o vetor das variáveis de H.

Utilizando-se das três equações, então \mathbf{A} possui dimensão 12×9 , e utilizando-se apenas duas equações \mathbf{A} possui dimensão 8×9 . Em qualquer caso, \mathbf{A} possui 8 graus, pois uma solução é nula. Assim a solução de \mathbf{h} pode apenas ser determinada sobre um escalar diferente de zero. Como H é geralmente determinado sobre um escalar, então a solução \mathbf{h} é considerada obrigatória para H. O escalar pode ser arbitrariamente escolhido para \mathbf{h} tal como $\|\mathbf{h}\| = 1$.

Solução Sobre-Determinada

Se mais de quatro pontos $\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}'_i$ correspondentes são dados, então o conjunto de equações $\mathbf{A} \mathbf{h} = 0$ é sobre-determinada. Se a posição dos pontos

são exatos, então a matriz \mathbf{A} continuará sendo de 8 graus e existirá uma solução exata para \mathbf{h} .

Mas, se as coordenadas forem inexatas a determinação do sistema $\mathbf{A}\mathbf{h} = 0$ também será inexato, exceto com a solução igual a zero, que não nos interessa. Então, ao invés de uma solução exata, uma solução aproximada será buscada. Em outras palavras, um vetor \mathbf{h} que minimiza uma função de custo apropriada.

A questão que naturalmente surge é "o que dever minimizado?". Geralmente a condição da norma é usada, como $\|\mathbf{h}\| = 1$. O valor da norma é desprezível, visto que \mathbf{H} é determinado até certa escala. Dado que não existe solução exata para $\mathbf{A}\mathbf{h} = 0$, parece natural tentar minimizar a norma $\|\mathbf{A}\mathbf{h}\|$ em invés de $\|\mathbf{h}\| = 1$. Este problema é semelhante ao de encontrar o menor quociente, como mostrado em Hartley (2004) A3.4.2 (p563). O algoritmo resultante é conhecido como Algoritmo DLT (Direct Linear Transformation).

2.3.2 Método Homogêneo

Escrevendo a matriz \mathbf{H} em um vetor $h = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33})^T$ a equação homogênea $\mathbf{x}'_i = \mathbf{H}\mathbf{x}_i$ para n pontos torna possível $\mathbf{A}\mathbf{h} = 0$, com \mathbf{A} sendo a matriz $2n \times 9$ abaixo:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -y_1X_1 & -X_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1Y_1 & -y_1Y_1 & -Y_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -y_2X_2 & -X_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2Y_2 & -y_2Y_2 & -Y_2 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_nX_n & -y_nX_n & -X_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -x_nY_n & -y_nY_n & -Y_n \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

O resultado padrão da álgebra linear na qual o vetor h que minimiza o residual algébrico $|Ah|$, com $|h| = 1$, é dado pelo *eigenvector* do menor *eigenvalue*

2.3.3 Erro Geométrico da Homografia

O erro geométrico consiste em encontrar os melhores pontos correspondentes entre imagens que estão relacionados por uma homografia (Moravec, 1977). Em outras palavras, dado a homografia e pares de pontos correspondentes, determinar os pares de pontos que consistem exatamente da homografia e que minimizam a distância geométrica dos pontos dados, ou seja, calcular o erro (ou distância) do ponto que respeita a homografia. O problema do erro geométrico está fortemente relacionado com o problema de triangulação.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo dá a visão geral dos trabalhos relacionados e sua análise crítica, apontando vantagens e as desvantagens das suas técnicas e metodologias utilizadas.

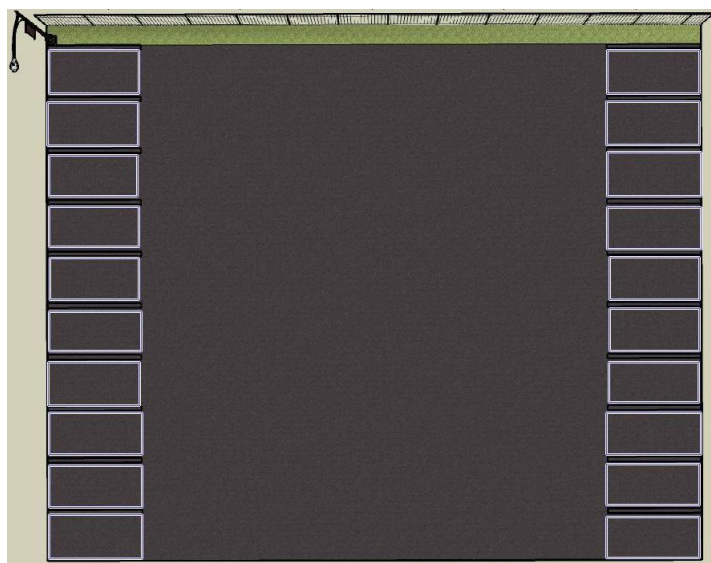


Figura 3.1: Modelo sintético de estacionamentos e visualização dos ROI definidos.

de cor como característica para detecção de vaga. O problema ocorre quando a cor dos automóveis são semelhantes à cor do pavimento, o que é bastante comum. Se pode observar na Figura 3.4 e Figura 3.3 os histogramas das vagas do estacionamento (ver Figura 3.1 e Figura 3.2) são muito similares, mesmo para veículos com cor diferente do pavimento.

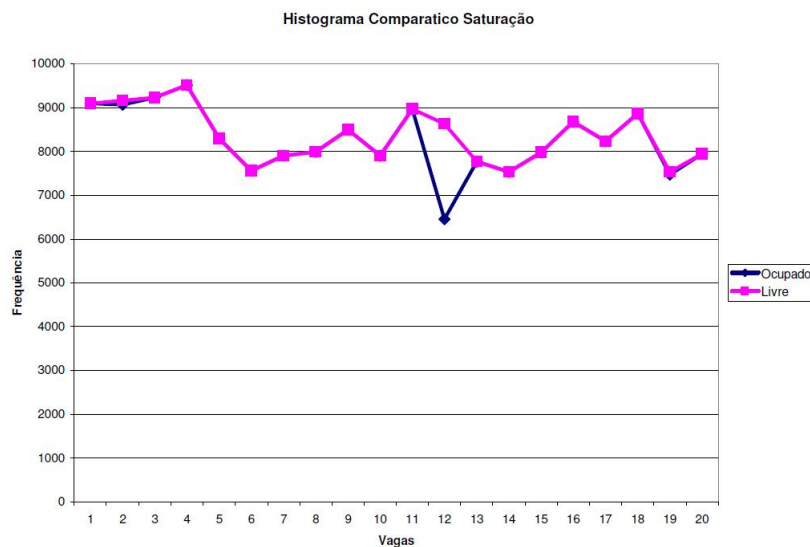


Figura 3.3: Histograma de cor (saturação) para cada vaga do estacionamento. Este gráfico mostra que somente utilizar histograma de cor para diferenciação entre vagas ocupada ou livres são ineficientes devido ao seu alto nível de semelhança entre tais regiões.

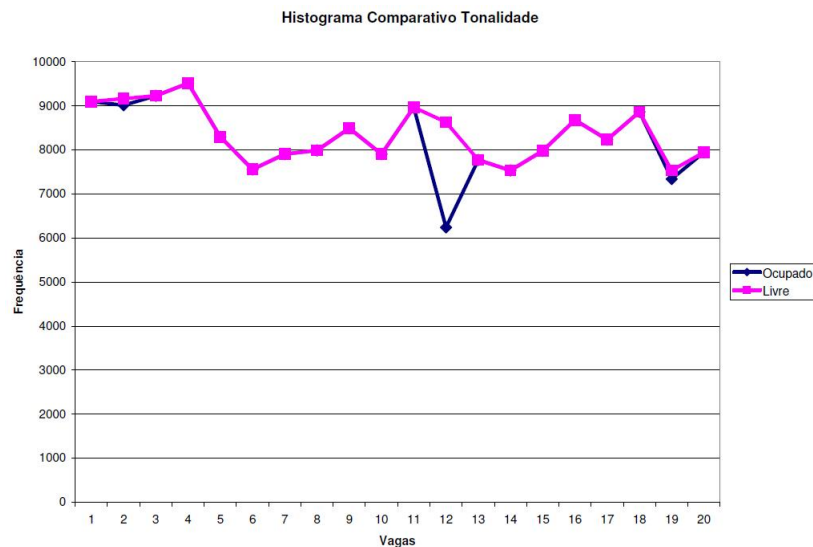


Figura 3.4: Histograma de cor (tonalidade) para cada vaga do estacionamento.

Uma outra proposta apresentada por Honeywell (2005) utiliza sensores que controlam a entrada e saída de veículos dizendo se há ou não vaga disponível. Entretanto, não há controle da quantidade de veículos e nem do posicionamento das vagas. Uma desvantagem é a utilização de sensores magnéticos sobre o asfalto em cada vaga. Tornando, tal sistema impraticável em grandes parques de estacionamento, devido ao alto custo de tais sensores.

Outra abordagem para a detecção de vagas em estacionamento foi utilizado por Wu (2006). A idéia geral de Wu (2006) está dividida em quatro fases: *préprocessamento* - consistindo na seleção, rotação da região de interesse da imagem sendo particionada em três vagas de estacionamento. *"Extração de característica"* - consistindo da probabilidade que indica a comparatividade entre um modelo prédefinido de três vagas e a região extraída da imagem. *Reconhecimento* - consistindo na classificação utilizando SVM (*Support Vector Machine*) em uma das oito classes definidas durante a fase de préprocessamento utilizando-se da probabilidade obtida. E por fim *Verificação e correção*

de conflitos - consistindo na verificação de presença ou ausência de veículo em cada parte das três vagas da região e também consiste na correção de classificações conflitantes utilizando-se cadeia de markov. A vantagem deste trabalho está no sucesso obtido utilizando SVM para classificar histograma de cor de espaços de estacionamentos. Em tal trabalho foi utilizado multi-classes (3 classes) no SVM e Campos Aleatório Markov (Markov Random Fields) foi utilizado para melhorar o resultado final de classificação para resolver classificações conflitantes entre dois vizinhos no espaço de três dimensões. Entretanto, a desvantagem está na situação quando os automóveis possuem cores semelhantes a cor do pavimento.

Um outro trabalho mais interessante que determina a existência e localização de veículos no estacionamento é o apresentado por Agarwal e Roth (2002). A vantagem deste trabalho está na utilização da detecção de características de veículos sobre classificação com histograma de cor. A detecção de característica não irá confundir os veículos os quais a cor é muito similar a cor do pavimento devido ao baixo nível de luz ou devido à própria cor do veículo. Entretanto, uma desvantagem observada é o treinamento com imagens de veículos capturadas apenas por um ângulo.



Figura 3.5: Exemplo de imagens de pontos de interesse e resultado após utilização de cluster para agrupamento de espaços semelhantes mostrado por Agarwal e Roth (2002).

Um outro trabalho de detecção de automóveis de grande interesse é o apresentado por Schneiderman (2000) e Schneiderman e Kanade (2000). Schneiderman (2000) utiliza o histograma de imagens de automóveis e motocicletas capturados à partir de pontos de vista importantes para sua detecção. A vantagem deste trabalho é a possibilidade de detectar automóveis e motocicletas à partir de diversos ângulos e também utiliza a transformação *wavelet* para representação de uma imagem (Figura 3.6). A desvantagem deste trabalho em comparação a metodologia desenvolvida nesta dissertação está na restrição de sua aplicação, permitindo somente a detecção de automóveis e motocicletas na área de interesse.



Figura 3.6: Resultado da detecção de veículos mostrada por Schneiderman (2000).

Carvalho et al. (1998) apresenta uma técnica de calibração de câmera utilizando mínimos quadrados. E mostra uma aplicação interessante que combinada informações da cena mapeadas para a imagem e vice-versa. E a utiliza para realização de estimativas de algumas distâncias ou pontos na cena (Figura 3.7). A vantagem deste trabalho se dá pela generalidade a qual

pode ser empregada tal técnica de estimar pontos na cena através de imagens de câmeras com sobreposição em seus campos de visão. Uma desvantagem em relação a metodologia desenvolvida nesta dissertação é a utilização de no mínimo duas câmeras com seus campos de visão com sobreposição.

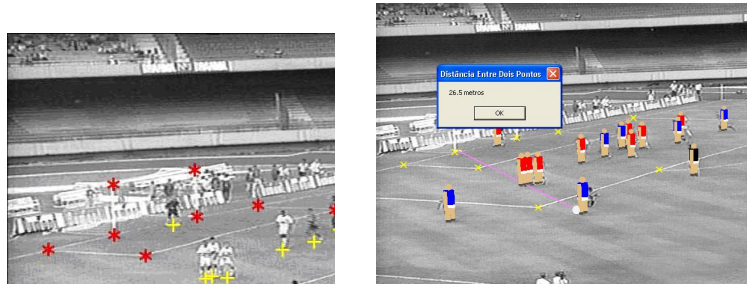


Figura 3.7: Imagens utilizadas por Carvalho et al. (1998) mostrando pontos de referência e depois estimando a distância entre dois pontos de seu interesse.

Em Criminisi et al. (1997) tem-se um trabalho capaz de obter medidas do mundo plano. A vantagem deste trabalho é a possibilidade de obter medidas da cena a partir de suas imagens perspectivas e com precisão estimar a incerteza de tal medida. O autor utiliza para isso a homografia planar ou transformação projetiva. E também justifica o uso do SVD (*Singular Value Decomposition*) para obter a homografia, pois possui residual zero e a matriz h é um vetor não nulo da matriz A . E utilizando o método do autor pode-se também calcular a incerteza da distância euclidiana entre pontos estimados através da homografia (Figura 3.8). Uma desvantagem deste trabalho é a perda da informação tridimensional, sendo possível somente a estimativa de pontos que estejam sobre um plano.

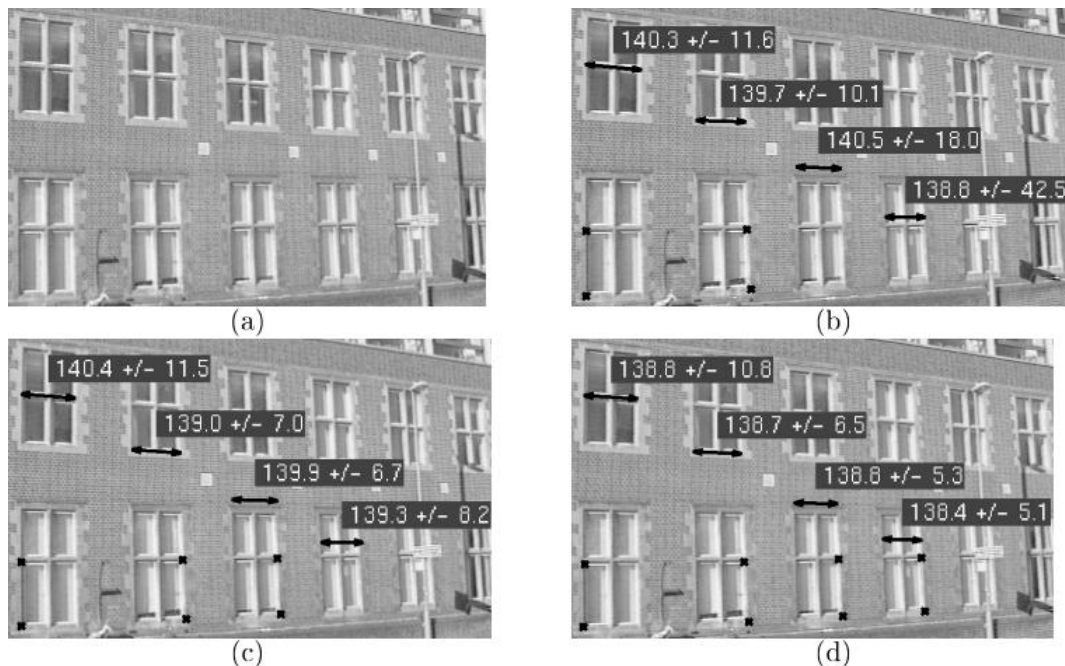


Figura 3.8: (a) imagem original. (b-d) a medida baseada na homografia calculada a partir dos pontos marcados com asterisco preto. Imagens utilizadas por Criminisi et al. (1997) mostrando pontos de referência e depois estimando a distância entre dois pontos de seu interesse.

Um outro trabalho relacionado é o apresentado por Silva (2006) que realiza classificação não apenas detectando veículos, mas classificando-o como de pequeno, médio ou grande porte (Figura 3.9). O autor objetiva realizar o controle de tráfego de veículos utilizando técnicas de visão computacional. A vantagem deste trabalho é a boa precisão de detecção de veículos mesmo em movimento. Uma desvantagem é a possibilidade de detecção apenas de veículos. O que não seria o suficiente para a detecção de espaço livre em estacionamento, visto que outros objetos podem estar presentes na cena.



Figura 3.9: As imagens representam o resultado da detecção de veículos em movimento conforme apresentado por Silva (2006).

A metodologia desenvolvida nesta dissertação é diferente de todos os trabalhos relacionados porque além de utilizar pontos de interesse para detectar espaço livre, utiliza também a distância para verificar a existência de espaço. E a principal contribuição está também na maneira como é realizada a estimativa. A distância pode ser obtida utilizando-se apenas uma imagem e o conhecimento de quatro pontos da cena ou através de pontos estimados utilizando o processo de reconstrução por triangulação do sistema estéreo.

Capítulo 4

Metodologia

A metodologia aqui desenvolvida utiliza sensores visuais e informação geométrica, para detectar vagas livres em grandes regiões densamente ocupadas, como parques de estacionamento. O objetivo deste capítulo é responder a seguinte pergunta: quais procedimentos metodológicos e técnicas foram utilizados para o desenvolvimento da metodologia nesta dissertação?.

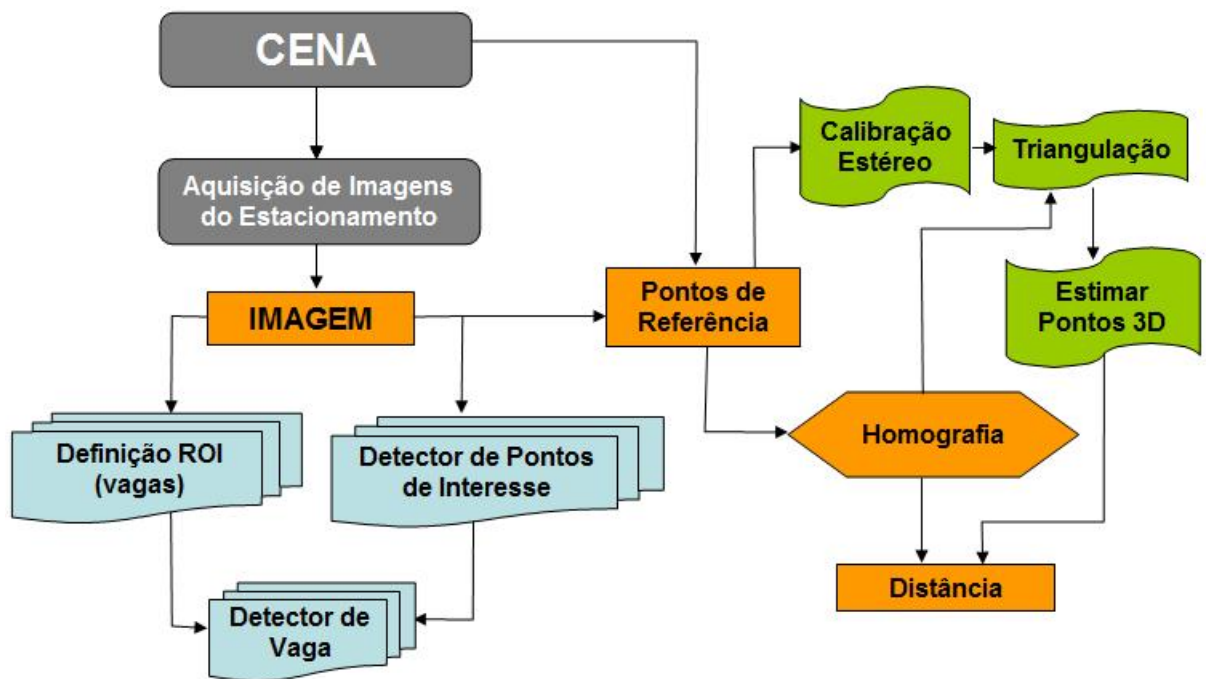


Figura 4.1: Representação esquemática dos módulos da metodologia desenvolvida para detecção de espaço livre em regiões densamente ocupadas. Dividida em quatro módulos realizados respectivamente como apresentado: aquisição de imagens, detecção de vagas utilizando detector de características e por fim a utilização da homografia e visão estéreo para estimativa da distância.

A metodologia é composta de quatro módulos principais. Os módulos principais são:

1. Aquisição de imagens;
2. Detecção de vagas utilizando detector de características;
3. Estimativa da distância utilizando homografia;
4. Estimativa da distância utilizando visão estéreo.

Os processos da metodologia estão sumariamente organizados na seguinte maneira. *aquisição de imagens*, consistindo na captura de imagens com sobreposição em seus campos de visão sobre a área de interesse. *detector de vagas*, consistindo da definição de regiões de interesse e utilização de pontos de interesse para detecção de espaço livre em estacionamento. *Homografia Direta*, consistindo na utilização da homografia entre espaço planar da cena e plano de projeção das câmeras para detecção de espaço livre, através da estimação de distâncias. E por fim, utiliza-se a *visão estéreo*, onde os pontos correspondentes são estimados através da homografia entre as imagens, para que por meio da triangulação possa-se detectar espaço livre através das distâncias estimadas.

A Figura 4.1 mostra de forma esquemática os processos realizados para o desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação. Cada módulo será detalhado nas seções seguintes.

4.1 Aquisição de Imagens

O módulo de *aquisição de imagens* consiste na maneira como as imagens devem ser capturadas. Ou seja, consiste em descrever como devem ser realizadas a aquisição de imagens segundo algumas restrições quanto ao campo de visão das câmeras.

Há duas restrições principais para o processo de *aquisição de imagens*. As câmeras C_i utilizadas para a captura de imagens I_i devem estar posicionadas de maneira que todo o plano α da área de interesse seja visível, com $i = 1, 2, \dots, n$, onde n é o número de câmeras C com respectivas imagens I .

E assim como na restrição anterior, todas as câmeras C_i utilizadas para a captura de imagens I_i devem estar posicionadas de maneira que todo o plano α da área de interesse seja visível, com $i = 1, 2, \dots, n$, onde n é o número de câmeras C com respectivas imagens I . E todas as câmeras C_i tem que obrigatoriamente ter sobreposição em seus campos de visão.

Na segunda restrição, faz-se necessário que as câmeras C_i tenham sobreposição em seus campos de visão para calibração do sistema estéreo. Já a exigência de ter câmeras C_i cobrindo o plano α , independente de sobreposição, é para a utilização de homografia direta entre plano α da cena e os planos I_i de projeção das câmeras.

Para primeira restrição descrita, faz-se necessário a existência de delimitações (faixas de estacionamento) P_i no plano α do estacionamento, com $P_i = [(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots (X_j, Y_j)]$, onde j é a quantidade de pontos do polígono de uma delimitação, i a quantidade de vagas do estacionamento e (X, Y) são pontos no sistema de referência do plano α do estacionamento.

Isso torna-se necessário para a detecção de espaço livre utilizando o detector de características para verificação de presença ou ausência de objetos sobre as áreas de interesse ROI_i nos planos I_i de projeção das câmeras, com $ROI_i = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_j, y_j)]$, onde j é a quantidade de pontos do polígono de uma delimitação, i a quantidade de vagas do estacionamento e (x, y) são pontos no sistema de referência dos planos I_i de projeção das câmeras.

As imagens I_i podem ser capturadas com longo *baseline* entre câmeras C_i . E por fim, uma observação importante é a não alteração do posicionamento e direção das câmeras para realização da metodologia.

4.2 Detecção de Espaço Livre Utilizando Detector de Características

Esse módulo consiste da descrição de detecção de espaço livre. Tal módulo é composto dos seguintes processos: definição manual de regiões de interesse nas imagens, verificação de pontos de interesse em tais regiões permitindo detectar espaço livre para estacionamento de veículos. Os pontos de interesse são detectados utilizando-se *harris corner detection* (Harris (1988)).

As regiões de interesse ROI_i nos planos I_i de projeção das câmeras são definidas selecionando-se os pontos $[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_j, y_j)]$, onde j é a quantidade de pontos do polígono de uma região i de interesse, com $i = 1, 2, \dots, n$, onde n é o número de regiões de interesses definidas.

As regiões de interesse ROI_i selecionadas manualmente nas imagens I_i representam as áreas das vagas P_i no plano α do estacionamento.

Utiliza-se regiões de interesse, do inglês (*region of interest - roi*), porque definiu-se previamente as áreas de cada vaga P_i referente ao espaço livre que se deseja detectar. E permite também a rotulação das vagas do estacionamento.

Para a detecção de pontos de interesse, foi utilizado um algoritmo, conhecido como *harris corner detection*, baseado na função de autocorrelação (Equação 4.1) local nas diversas direções de cada ponto $(x_i, y_i) \in I$. Tal função é definida como a soma do quadrado da diferença, em inglês *sum of squared differences (SSD)*, dos pixels que estão a um raio r de cada ponto central $(x_i, y_i) \in I$, multiplicado pela constante ou resultado da função gaussiana W de cada ponto (x_i, y_i) para suavização da imagem.

$$c(x, y) = \sum_W [I(x_i, y_i) - I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y)]^2. \quad (4.1)$$

Harris (1988) assumiu que as variações Δx e Δy são pequenas e realiza uma aproximação de $I(x_i + \Delta x, y_i + \Delta y) \approx I(x_i, y_i) + I_x(x_i, y_i)\Delta x + I_y(x_i, y_i)\Delta y$, utilizando a expansão *Taylor* (Cantão (2009)) apenas de primeira ordem, onde I_x e I_y são as derivadas parciais em função de x e y , respectivamente.

A função resultante após algumas simplificações é apresentada na Equação 4.2.

$$c(x, y) = [\Delta x \Delta y] Q(x, y) [\Delta x \Delta y]^T, \quad (4.2)$$

onde

$$Q_{(x, y)} = \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

Derpanis (2004) mostra que a detecção ou não de pontos de interesse está restrita a três casos específicos de variações de sinais dos *autovalores* λ_1, λ_2 da matriz de Q . Os pontos característicos são identificados pela larga variação da função $c(x, y)$. Mas, Harris (1988) ao invés de calcular os autovalores da matriz Q utiliza uma função representada na Equação 4.4.

$$\begin{aligned} H &= \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \\ H &= \det(Q) - k \operatorname{diag}^2(Q), \end{aligned} \quad (4.4)$$

Onde $\det(Q) = (I_x^2 I_y^2) - (I_x I_y)^2$, $\operatorname{diag}^2(Q) = (I_x^2 + I_y^2)^2$ e k é um parâmetro de sensibilidade ajustável manualmente. O valor de k é determinado empiricamente, onde a literatura mostram $0.04 \leq k \leq 0.15$ são valores possíveis.

E por fim, o algoritmo proposto por Harris (1988) seleciona o valor máximo de uma janela $[5 \times 5]$ utilizando a função $H(x, y)$, com (x, y) sendo ponto o central. E utiliza um limiar T para escolha final de pontos de interesse.

E por fim, verifica-se a existência de pontos característicos $p_i = (x, y)$, resultante do algoritmo de detecção de pontos característicos, sobre as regiões de interesse ROI_i definidas. Então, se existir pelo menos um ponto p_i na região de interesse ROI_i , tal espaço é considerado ocupado, caso contrário, é considerado desocupado.

4.3 Estimando Distância Utilizando Homografia

A homografia é utilizada para estimar a distância entre pontos na cena. São necessários quatro pontos correspondentes para a criação da homografia entre plano da imagem e plano da cena.

Os pontos escolhidos são utilizados para o processo de estimação da homografia entre o plano da imagem e plano da cena utilizando o (*algoritmo de transformação linear direta*) apresentado por Hartley (2004), resumidamente descrito no capítulo anterior.

A segunda maneira é utilizando a *visão estéreo*. Resumidamente, é realizada apenas a reconstrução dos pontos necessários através de triangulação do par de imagens para o cálculo da distância. Nas seções seguintes, tem-se a descrição detalhada tanto da utilização de homografia quanto de visão estéreo para estimar a distância entre os objetos de interesse no estacionamento.

4.3.1 Utilizando Homografia apenas com uma Imagem

Estimar a distância utilizando apenas uma imagem é realizada de maneira direta como mostrado em Hartley (2004). Foi utilizado o método de estimação exata utilizando apenas quatro pontos para estimação da homografia. Escolhe-se quatro pontos conhecidos no sistema de referência da cena e identifica-se tais pontos na imagem. Com base nesses quatro pontos do sistema de referência do mundo e da imagem estima-se a matriz de homografia através da matriz A (Equação 4.5), com dimensão $2N \times 9$, com N , sendo a quantidade de pontos de entrada, neste caso, com $N = 4$.

$$A = \begin{pmatrix} X_i & 0 & -X_i * x_i & Y_i & 0 & -Y_i * x_i & 1 & 0 & -x_i \\ 0 & X_i & -X_i * y_i & 0 & Y_i & -Y_i * y_i & 0 & 1 & -x_i \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_n & 0 & -X_n * x_n & Y_n & 0 & -Y_n * x_n & 1 & 0 & -x_n \\ 0 & X_n & -X_n * y_n & 0 & Y_n & -Y_n * y_n & 0 & 1 & -x_n \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

A *Singular Value Decomposition* - *SVD* da matriz A é calculada. Com o cálculo do *Singular Value Decomposition* - *SVD* da matriz A obtém-se a matriz diagonal S com a mesma dimensão da matriz A , com os elementos da

diagonal em ordem decrescente, e matrizes unitárias U e V , onde $A = U.S.V^T$ (Anderson (1999) e Matos (2008)).

A matriz de homografia H é a própria matriz V resultante do cálculo do *Singular Value Decomposition* - *SVD* da matriz A . Após estimação da matriz H pode-se obter de maneira direta a transformação de pontos da imagem em pontos da cena ou vice-versa.

Para obtenção dos pontos de interesses para cálculo da distância (distância euclidiana), na cena, basta multiplicar a matriz de homografia H^{-1} pelo ponto de coordenada da imagem. E em seguida transformar em coordenada cartesiana, visto que tal ponto está representado em coordenada homogênea.

4.3.2 Estimando Distância Utilizando Visão Estéreo

Estimar a distância utilizando visão estéreo pode ser baseado no princípio de como o cérebro humano estima distâncias utilizando duas imagens da mesma cena.

Para utilizar a estereoscopia para estimação da distância são necessários as seguintes etapas:

1. Calibração de câmera;
2. Calibração estéreo;
3. Triangulação para estimar pontos no mundo;
4. Cálculo da distância entre os dois pontos estimados.

Calibração de Câmera

O processo de calibração utilizado tem como entrada n pares de pontos correspondentes entre plano da cena e plano da imagem. Os pontos correspondentes foram estimados através da homografia definida conforme explicado na seção anterior. Em outras palavras, utilizou-se apenas quatro pontos para

a estimação da homografia. E com tal homografia foram estimados n pontos entre plano da cena e plano da imagem. A técnica de calibração utilizada é a mesma apresentada por Tsai (1987), Heikkila (1997). Que resumidamente é dividida em quatro fases:

1. *Rigid body transformation* entre os pontos correspondentes, calibrando a matriz de rotação R e translação T ;
2. Projeção perspectiva segundo a geometria do modelo de câmera *pin hole*, calibrando a distância focal, f ;
3. Distorção radial, calibrando a distorção k_1 k_2 ;
4. E a incerteza do fator de escala s_x para a imagem da coordenada do mundo.

Tanto Tsai (1987) quanto Heikkila (1997) utilizam como base a *Direct Linear Transformation* - *DLT* para estimação linear de parâmetros. Para mais detalhes teóricos sobre a calibração utilizada ver em Tsai (1987).

Calibração Estéreo

O processo de calibração estereo utilizado é o mesmo apresentado por Bouguet (2008), onde se considera que a geometria do sistema não é alterada com o tempo. Com isso, os parâmetros *intrínsecos* do sistema estereo também permanecerá inalterado. Já os parâmetros *extrínsecos* do sistema estereo podem ser obtidos como apresentado em Trucco e Verri (1998) (ver Equação 4.6).

$$\begin{aligned} R &= R_r R_l^T \\ T &= T_l - R^T T_r \end{aligned} \tag{4.6}$$

R_r , T_r , R_l , T_l são respectivamente as matrizes de rotação e translação da câmera da direita e esquerda. E R e T são as matrizes de rotação e translação do sistema estereo. Os pontos de referência utilizados foram estimados utilizando-se a matriz de homografia entre a imagem e plano da cena. Considera-se apenas os pontos do estacionamento que estão no plano XY .

Triangulação para Estimar Pontos no Mundo

A estimativa de pontos homólogos entre as imagens, para o processo de reconstrução utilizando a *triangulação*, foi realizada com a homografia entre quatro pontos correspondentes em cada imagem.

O método de triangulação utilizado foi proposto por Bouguet (2008). Para a triangulação os parâmetros necessários são:

- Pontos correspondentes nas imagens;
- Matrizes de rotação e translação do sistema estéreo;
- Parâmetros intrínsecos de ambas as câmeras.

Como já observado em Bouguet (2008) e Trucco e Verri (1998) a triangulação é realizada através da interseção das duas retas tridimensionais formadas entre os pontos correspondentes. E como em todas as maneiras abordadas para cálculo da distância, utiliza-se a distância euclidiana entre os pontos reconstruídos.

A Figura 4.2 ilustra a geometria do processo de triangulação, mostrando as equações representando a relação entre os sistemas de coordenadas de ambas as câmeras e como obter a reconstrução tendo conhecimento dos parâmetros intrínsecos de ambas as câmeras e os parâmetros extrínsecos do sistema estéreo.

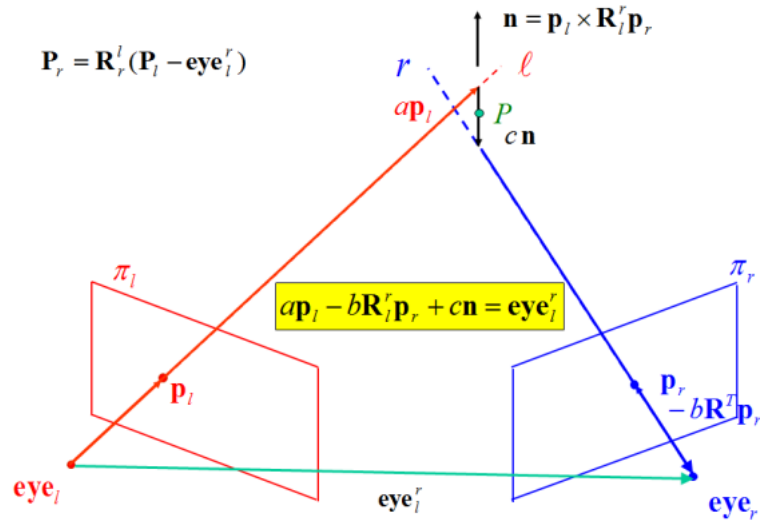


Figura 4.2: Representação geométrica do processo de triangulação, mostrando equações que relacionam os sistemas de referência das câmeras e a construção através de triangulação, respectivamente.

Capítulo 5

Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais realizados e os resultados obtidos seguindo a metodologia apresentada no capítulo anterior. São realizadas discussões em relação ao procedimento e aos resultados obtidos. E ao final de cada etapa são feitas análises críticas em relação a cada abordagem.

5.1 Descrição dos Procedimentos Experimentais

O procedimento experimental está dividido em três grandes etapas: Primeira, *avaliação do modelo sintético*, apresentando a robustez do modelo na presença de ruídos. Segunda, *avaliação controlada do modelo em escala*, adicionando também outras informações ruidosas, como por exemplo, variação de iluminação e posicionamento de câmera. E por fim, *avaliação operacional*, sem nenhum controle sobre a cena.

5.1.1 Material Utilizado

Os equipamentos, e suas respectivas configurações, utilizados para o desenvolvimento dos experimentos são:

- Notebook: Acer

- Model: Apire 4315-2904
- Processador: Intel Celeron
- CPU: 2.13 GHz
- Memória RAM: 1 GB
- Tipo de sistema: 32 bits
- Câmera de vídeo digital: JVC
 - Modelo: GZ-MG330
 - JVC digital camcorder
 - 0.8 Megapixel CCD sensor
 - 35 x optical zoom (with stabilizer)
 - 800x digital zoom.
 - 2.7"(112000 pixel) monitor.
 - Camcorder size: 54x68x113 mm.
- 2 (dois) Tripés: Vanguard
 - Modelo: AK-4
- Fita métrica de 20 (vinte) metros e régua de 30 (trinta) centímetros.

5.1.2 Forma de Avaliação dos Resultados Experimentais

Descreve-se nesta seção o que foi utilizado para a avaliação dos resultados experimentais.

É utilizado o erro absoluto para cada distância estimada e erro médio das distâncias estimadas. E sobre as amostras dos erros absolutos foram também calculados a variância e desvio padrão.

Um importante fator para qualquer experimentação é o nível de confiabilidade da metodologia. E para isso, utiliza-se intervalo de confiança para o erro médio absoluto das distâncias estimadas. Utiliza-se um intervalo de confiança de 90 % para o cálculo do limite inferior e superior do erro médio absoluto das distâncias estimadas, considerando também que todas as amostras possuem distribuição normal.

5.2 Avaliação do Modelo Sintético

Esta avaliação do modelo sintético, assim como já descrito na metodologia, consiste em utilizando-se de recursos sintéticos e totalmente controlados, avaliar quantitativamente a robustez das técnicas utilizadas, no detector de vagas utilizando detector de característica ou estimação da distância.

O requisito para a realização dos procedimentos experimentais para avaliação do modelo sintético é a criação de um estacionamento sintético através de um aplicativo de construção de ambientes sintéticos.

O modelo sintético de um estacionamento foi desenvolvido utilizando-se o software *Google SketchUp*. Durante a construção deste modelo alguns padrões arquitetônicos como largura ($25cm$), comprimento ($5m$) e distância entre faixas ($2,5m$) foram considerados para construção do estacionamento. Os modelos sintéticos dos automóveis utilizados são do banco de dados disponibilizado por *Google SketchUp*.

5.2.1 Aquisição de Imagens

Esse procedimento foi realizado alterando-se o posicionamento das câmeras. As imagens são adquiridas a partir do modelo sintético alterando-se a rotação e translação das câmeras utilizando-se de funcionalidades de rotação e translação disponíveis no *Google SketchUp*.

A aquisição de imagens é realizada seguindo algumas restrições. As áreas de interesse na cena devem está dentro do campo de visão das câmeras. Um

outra restrição é a sobreposição no campo de visão das câmeras que são utilizadas para a estimação de distâncias através de visão estéreo.

É realizada a captura de imagens alterando-se a rotação e translação da câmera com o intuito de verificar a robustez da metodologia de detecção de espaço livre em relação ao posicionamento das câmeras.

Foi realizada a aquisição de pares de imagens do modelo sintético variando-se rotação e translação da câmera em relação ao plano do estacionamento (ver Figura 5.1).

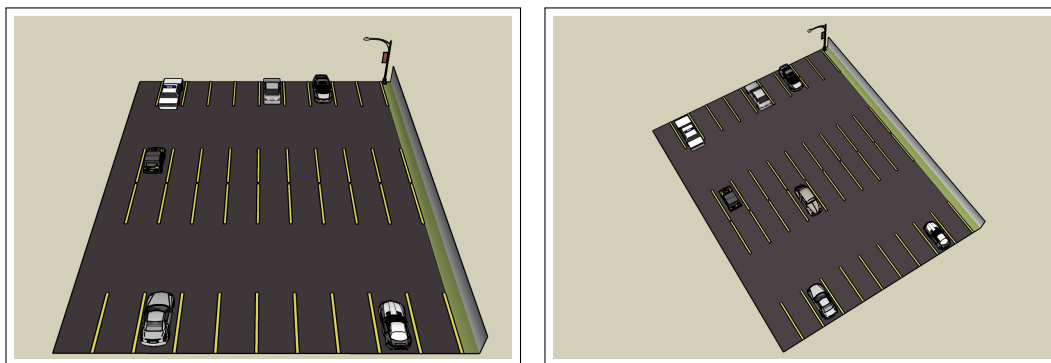


Figura 5.1: Estas são imagens capturadas do modelo sintético. Aquisição de imagens sintéticas alterando-se a o posicionamento da câmera, ou seja, alterando-se a rotação e translação da câmera.

5.2.2 Experimento 1 - *Detector de Vagas Utilizando o Corner Detection*

O objetivo desse experimento é verificar a invariância de rotação e translação do detector de espaço livre utilizando detector de características. Sendo assim, foram capturadas imagens variando-se a rotação e translação da câmera. As Figuras 5.2, 5.3, 5.4 representam a cena com mesma configuração das Figuras 5.5, 5.6, 5.7 capturadas variando-se a rotação e translação da câmera.

As Figuras 5.2, 5.3, 5.4 foram capturadas com a câmera na mesma posição e direção, assim como as Figuras 5.5, 5.6, 5.7. Tais figuras diferem somente em relação a distribuição dos veículos no estacionamento. Tal procedimento tem o objetivo de demonstrar que o detector de espaço livre utilizando detector de características é invariante em relação ao posicionamento de objetos que ocupam as vagas.

Este experimento consiste em avaliar se o detector de espaço é robusto para detectar objetos que estão sobre as áreas de cada vaga no estacionamento. As Figuras 5.2, 5.3, 5.4 mostram o resultado da detecção de vagas. As regiões de cor branca representam as vagas disponíveis e as de cor preta as vagas ocupadas. Cada Figura representa o mesmo estacionamento em momentos distintos. A taxa de acerto médio do detector de vagas livres mostra o sucesso dessa metodologia.

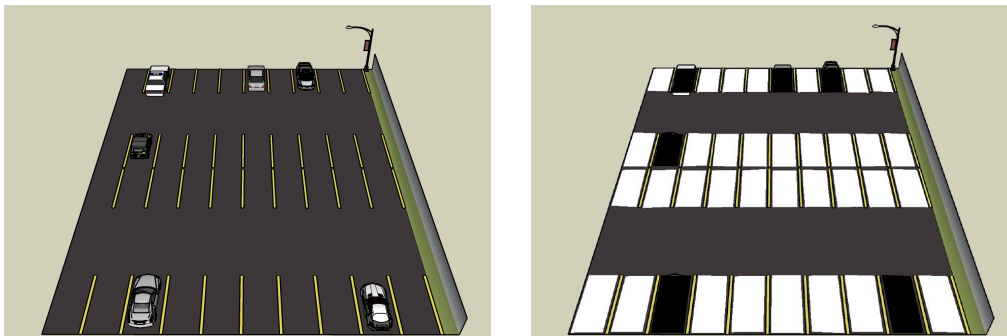


Figura 5.2: Configuração 1 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.

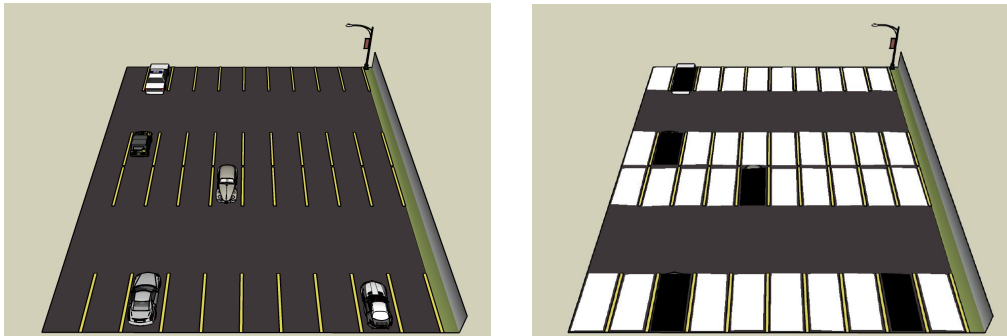


Figura 5.3: Configuração 2 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.

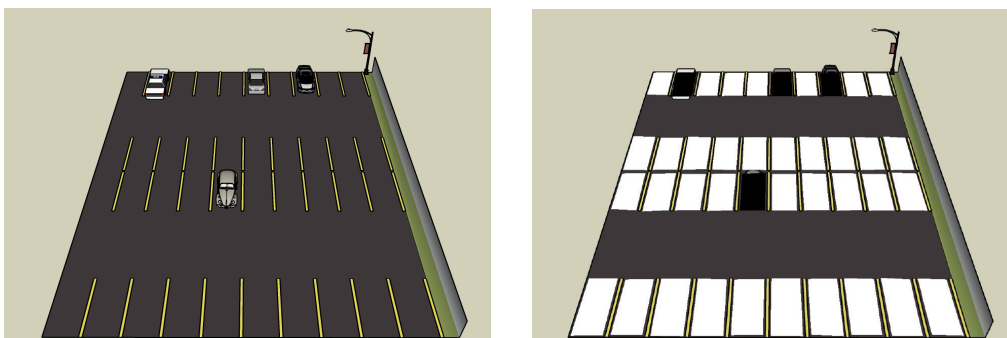


Figura 5.4: Configuração 3 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.

Este experimento foi também realizado alterando-se o posicionamento da câmera. As Figuras 5.5, 5.6, 5.7 mostram os resultados do detector de vagas. E assim como nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, as regiões de cor branca representam as vagas disponíveis e as de cor preta as vagas ocupadas. Cada figura representa o mesmo estacionamento em momentos distintos.

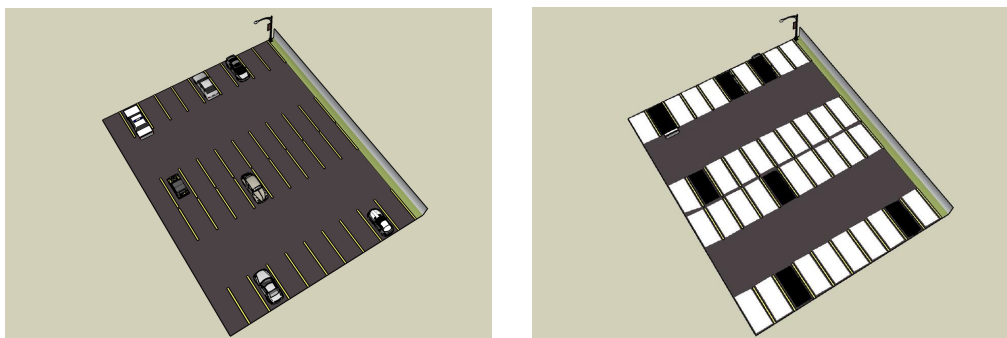


Figura 5.5: Configuração 1 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.

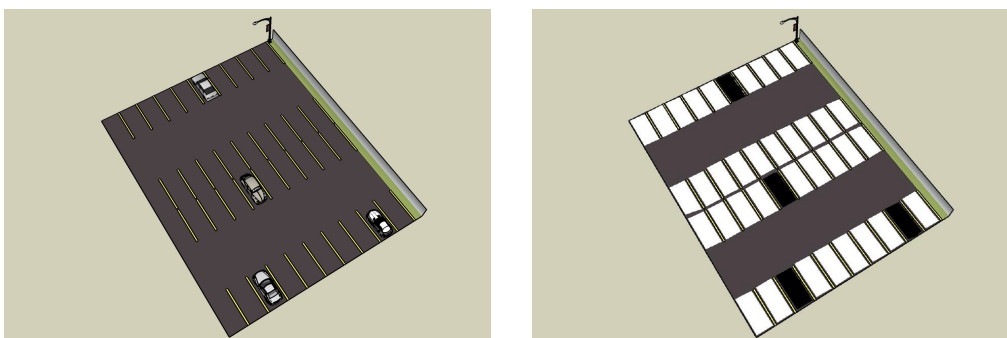


Figura 5.6: Configuração 2 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.

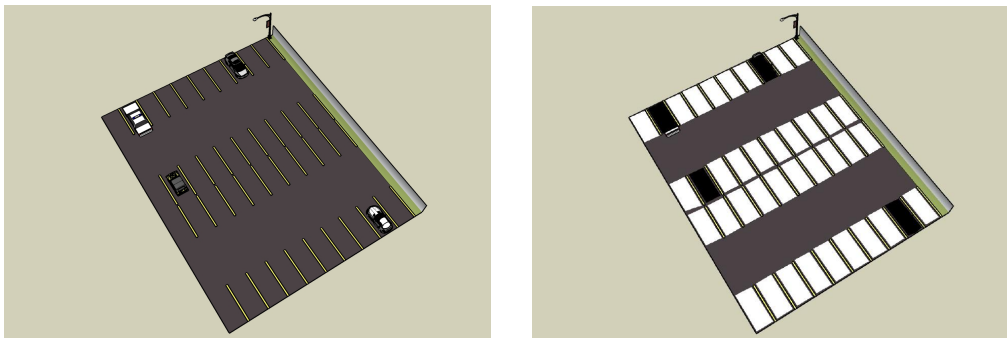


Figura 5.7: Configuração 3 - Resultado da detecção de espaço livre nas regiões de interesse. A taxa de acerto médio mostra ótimos resultados.

Com a alteração da rotação e translação da câmera que capturou a imagem da cena, como observado na Figura 5.2 e Figura 5.5, testa-se a metodologia de detecção de espaço livre em relação a variação de rotação e translação, característica inerente do detector de características utilizado. Pode-se observar que mesmo alterando-se a rotação e translação a metodologia permaneceu com resultados constantes, ou seja, com a mesma qualidade e precisão.

Foi também verificado a robustez da metodologia de detecção de espaço livre em relação a escala. A alteração da escala da imagem capturada pode representar a aquisição da imagem obtida mais próxima ou mais distante em relação ao plano da cena. Neste experimento foi realizado a redução da imagem original (Figura 5.2) em intervalos de 15 % reduzindo-se até 5 % em relação a imagem original (Campos (2009)). O aumento do erro em escalas reduzidas ocorre devido a concentração ou sensação de aproximação dos objetos na cena, fazendo com que o algoritmo de detecção de características, que é a base da metodologia de detecção de espaço livre tenha uma porcentagem maior de erro.

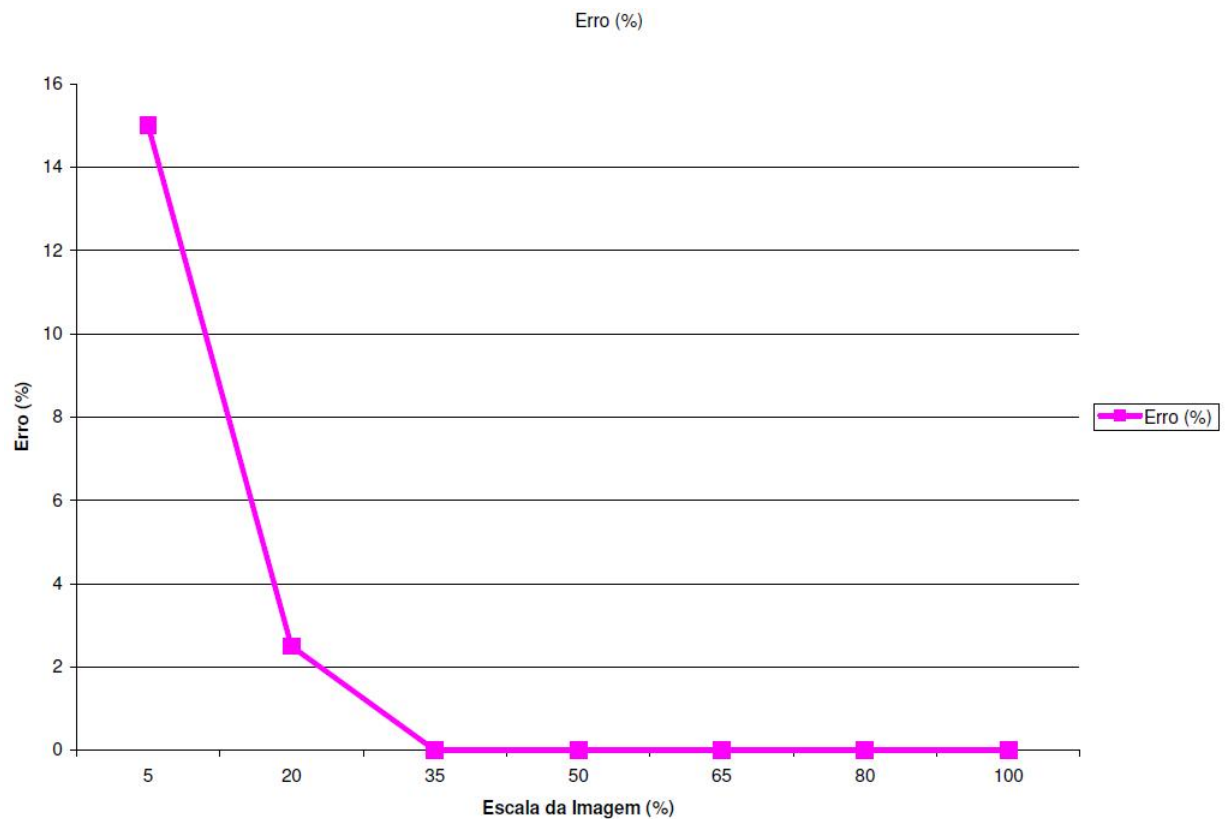


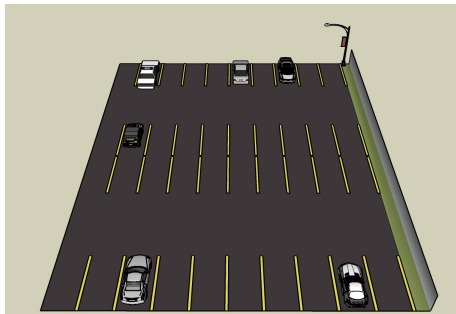
Figura 5.8: Gráfico representando a robustez da metodologia de detecção de espaço livre em relação a variação da escala da imagem. Também podendo ser interpretada como a alteração da rotação e translação da câmera distanciando-se do plano da cena. O eixo x são as variações de escala e o eixo y o erro da metodologia de detecção de espaço livre.

A Figura 5.8 representa a robustez da metodologia de detecção de espaço livre. Pode-se observar que apenas na situação onde a escala da imagem é de 5 %, o erro é de aproximadamente 15 %. Nas demais escalas superiores a 5 % observa-se um bom nível de detecção de espaço livre, com a porcentagem do erro sendo reduzido a zero.

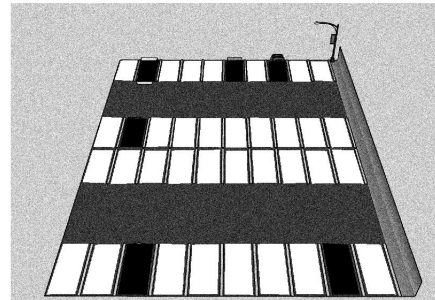
5.2.3 Experimento 2 - *Detector de Vagas Utilizando Corner Detection com ruído gaussiano nas imagens*

O objetivo deste experimento é verificar a robustez do detector de espaço livre sobre imagem ruidosa. Sendo assim, adicionou-se ruído *gaussiano* na imagem com média zero, variando-se a covariância de 0.01 à 0.05. O nível de ruído adicionado a imagem poderia representar uma imagem capturada em um ambiente com chuva.

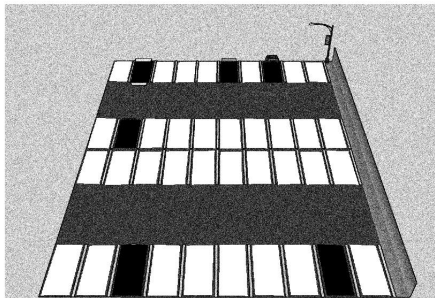
A Figura 5.9 apresenta os resultados da detecção de vaga, onde as regiões de cor branca representam as vagas disponíveis e as de cor preta as vagas ocupadas. Cada figura representa o mesmo estacionamento com ruídos distintos.



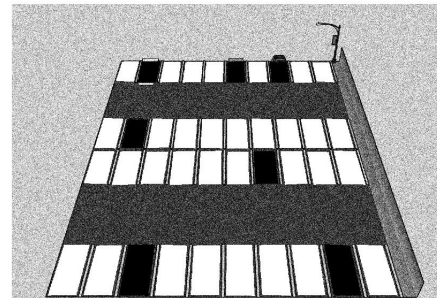
(a)



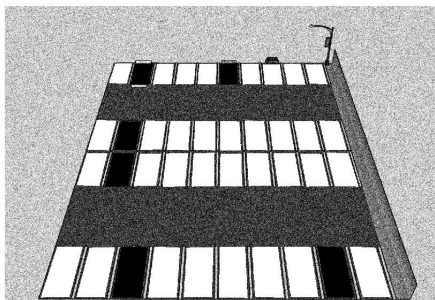
(b)



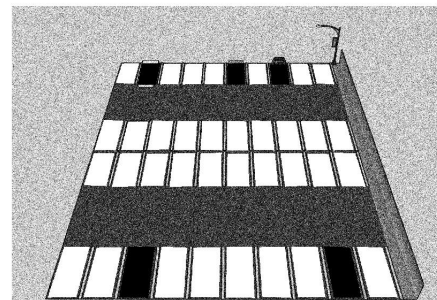
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5.9: A imagem (a) é a imagem original. E as imagens de (b) a (f) são as imagens com os respectivos ruídos *gaussiano*, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 e 0.05.

A tabela 5.1 mostra a taxa de acerto do detector de vagas sobre as imagens da Figura 5.9, com os respectivos ruídos *gaussiano*: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 e 0.05.

Tabela 5.1: *Relação Ruído Gaussiano e Taxa de Acerto*

Imagem	Ruído Gaussiano	Taxa de acerto (%)
Figura 5.9(b)	0.01	100
Figura 5.9(c)	0.02	100
Figura 5.9(d)	0.03	97.05
Figura 5.9(e)	0.04	94.1
Figura 5.9(f)	0.05	97.05
Taxa de acerto médio:		97.64

Observa-se também neste experimento a alta taxa de acerto mesmo com o nível de informação ruidosa da imagem elevada. Com esse experimento pode-se até concluir parcialmente que a metodologia de detecção de espaço livre poderá ser utilizada com sucesso em ambientes reais. Mas, isso só será confirmado na etapa de experimentação operacional.

5.2.4 Experimento 3 - *Detector de Vagas Utilizando Homografia*

O objetivo desse experimento consiste em detectar vaga livre no estacionamento através da distância estimada entre veículos ou quaisquer outros objetos na cena. Para isso, calcula-se a matriz de homografia H entre o plano do estacionamento e o plano da imagem. Para criação desta matriz, são necessários no mínimo quatros pontos conhecidos no referencial do mundo.

Para construção da matriz de homografia foi utilizado o algoritmo *Direct Linear Transformation* - *DLT* apresentado no Capítulo 2 desta dissertação. Os pontos utilizados são os apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: *Pontos para Construção da Homografia*

Mundo Real (m)		Imagem (pixel)	
X	Y	x	y
0	0	315	89
0	34.174	40	251
27.5	34.174	40	572
27.5	0	315	757

A Figura 5.10 apresenta o resultado obtido utilizando-se homografia para estimação de espaço livre em estacionamento. Onde a Tabela 5.2 apresenta os pontos utilizados para construção da homografia entre os pontos do mundo e pontos da imagem.

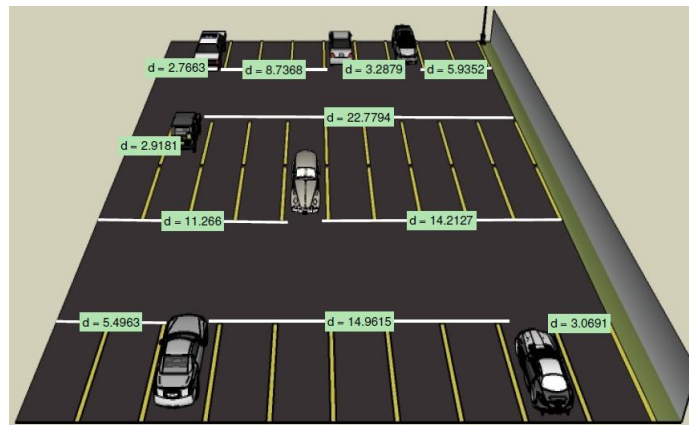


Figura 5.10: Esta imagem mostra as distâncias estimadas utilizando-se a matriz de homografia H utilizando apenas uma imagem. Utilizou-se diretamente a homografia entre plano da imagem e plano na cena para a estimação de pontos no mundo.

A Tabela 5.3 mostra o erro da distância estimada utilizando a matriz de homografia direta entre plano da cena e plano de projeção da imagem.

Tabela 5.3: *Erros das Distâncias usando Homografia*

<i>Distância Real (m)</i>	<i>Distância Estimada (m)</i>	<i>Erro (m)</i>
3.04	2.76	0.28
9.07	8.73	0.34
3.7	3.28	0.42
5.9	5.93	0.03
3.24	2.91	0.33
22.77	22.77	0.00
11.33	11.26	0.07
14.21	14.21	0.00
5.78	5.49	0.29
14.69	14.96	0.27
3.37	3.06	0.31
Erro médio:		0.21

Alguns dados estatísticos obtidos sobre os dados da Tabela 5.3 foram calculados. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 %. A $\sigma^2 = 0.0219$, $\sigma = 0.1478$, **limite inferior = 0.1394** e **limite superior = 0.2861**. O cálculo do intervalo de confiança foi realizado conforme descrito na seção, descrição de procedimentos experimentais.

Observa-se que a utilização da homografia para estimação da distância com intuito de verificar espaço livre apresenta resultados satisfatórios com baixa variância e com os limites do intervalo de confiança variando em torno de apenas 7 cm, o que não é um valor significativo neste contexto de detecção de vagas livres em parques de estacionamento. A baixa variação do erro é mostrado na Figura 5.11, comparando as distâncias reais e as distâncias estimadas através da homografia.

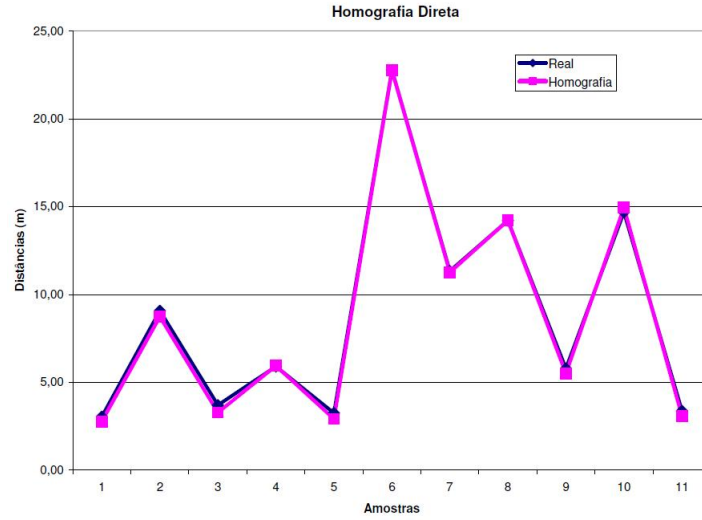


Figura 5.11: Esta imagem mostra a comparação entre as distâncias estimadas utilizando-se a matriz de homografia H direta entre plano da cena/projeção da imagem e distância real.

5.2.5 Experimento 4 - *Detector de Vagas Utilizando Visão Estéreo*

A aquisição das imagens foi realizada segundo as restrições já definidas nos procedimentos experimentais. Ou seja, duas câmeras virtuais com posição (X_1, Y_1, Z_1) e (X_2, Y_2, Z_2) com sobreposição em seus campos de visão capturaram imagens para cálculo dos parâmetros extrínsecos do sistema estéreo. Um requisito para o cálculo dos parâmetros extrínsecos do sistema estéreo é que ambas as câmeras do par estéreo já tenham sido calibradas sobre os mesmos pontos referenciais da cena. Com isso os parâmetros intrínsecos do sistema estéreo são os mesmos da calibração de cada câmeras, porque considera-se o posicionamento fixo de ambas as câmeras. Uma observação importante é que mesmo conhecendo todas as variáveis do sistema estéreo realiza-se calibração com o objetivo de considerar os erros inerentes a calibração para todo o procedimento experimental.

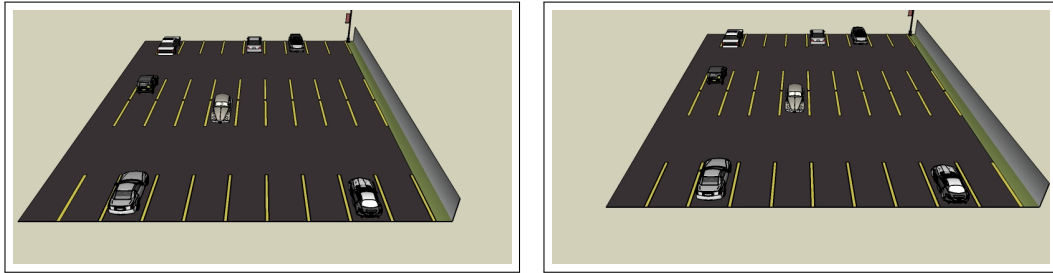


Figura 5.12: Estas foram as imagens utilizadas para realização do sistemas estéreo. A imagem (a) é a imagem do lado esquerdo e a imagem (b) é a imagem do lado direito do sistema estéreo.

Esse experimento consiste da utilização de visão estéreo para estimar as distâncias entre quaisquer objetos e veículos no estacionamento. Este experimento está dividido em duas etapas. Na primeira etapa, os pontos correspondentes entre as duas imagens utilizadas para realização do estéreo são selecionados manualmente. Já na segunda etapa, a correspondência entre os pontos é realizada através da homografia entre ambas imagens (Figuras 5.12).

A Figura 5.13 mostra o resultado da utilização da visão estéreo no processo de estimação da distância entre pontos na cena do estacionamento com a seleção manual de pontos correspondentes. A Figura 5.14 mostra o resultado da utilização da visão estéreo, utilizando homografia para realizar a correspondência entre os pontos, no processo de estimação da distância.

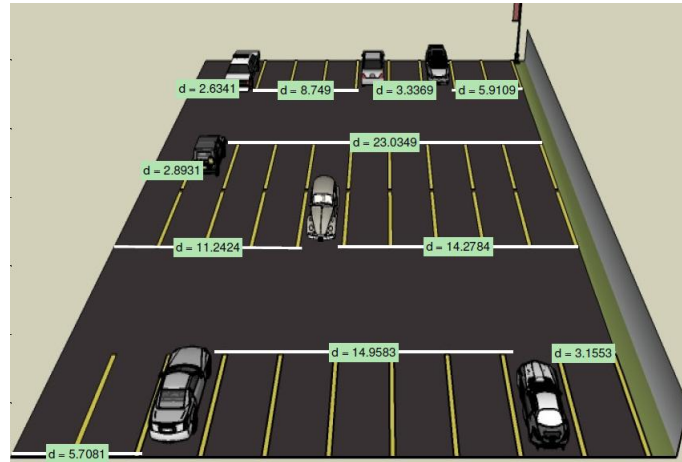


Figura 5.13: Esta imagem mostra quais as áreas podem ser ocupadas com base nas distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente.

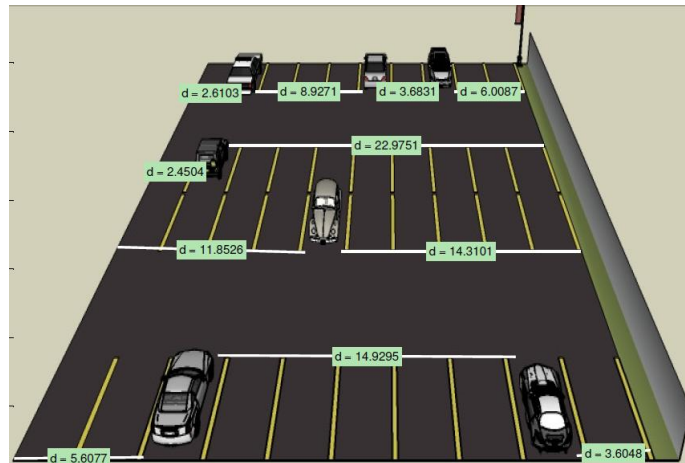


Figura 5.14: Esta imagem mostra as áreas que podem ser ocupadas com base nas distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo utilizando a homografia entre as imagens para estimação dos pontos correspondentes.

A tabela 5.4 mostra o erro da distância estimada pelo sistema estéreo com pontos de correspondência selecionados manualmente e o sistema estéreo utilizando a homografia entre as imagens para estimação dos pontos correspondentes.

Tabela 5.4: *Erro das Distâncias Estimadas usando Visão Estéreo*

<i>Real (m)</i>	Estéreo (m)	Erro (m)	Estéreo com H (m)	Erro (m)
3.04	2.63	0.41	2.61	0.43
9.07	8.75	0.32	8.92	0.15
3.7	3.33	0.37	3.68	0.02
5.9	5.91	0.01	6	0.1
3.24	2.89	0.35	2.45	0.79
22.77	23.03	0.26	22.97	0.2
11.33	11.24	0.09	11.85	0.52
14.21	14.27	0.06	14.31	0.1
5.78	5.7	0.08	5.6	0.18
14.69	14.95	0.26	14.9	0.21
3.37	3.15	0.22	3.6	0.23
Erro médio:		0.22	Erro médio:	0.27

A Tabela 5.4 apresenta o erro das distâncias estimadas pelo sistema estéreo tanto para os pontos selecionados manualmente quanto para os pontos de correspondências estimadas utilizando-se a homografia entre as imagens.

Foram obtidos algumas informações estatísticas da Tabela 5.4. Foi calculado os limites do intervalo de confiança dos erros do sistema estéreo com pontos selecionados manualmente sobre os dados da Tabela 5.4. Foi calculado os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 %, $\sigma^2 = 0.0177$, $\sigma = 0.1331$, **limite inferior = 0.1549** e **Limite Superior = 0.2869**.

São apresentados alguns dados estatísticos dos erros do sistema estéreo com pontos de correspondência estimados pela homografia entre as imagens conforme os dados da Tabela 5.4 para os erros do sistema estéreo com homo-

grafia entre imagens. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 % de certeza, $\sigma^2 = 0.0465$ e $\sigma = 0.2156$. Foram obtidos **limite inferior = 0.1594** e **limite superior = 0.3733**.

Observa-se nos resultado da estimativa das distância utilizando o sistema estéreo, tanto para os pontos correspondentes selecionados manualmente quanto para os pontos estimados pela homografia entre as imagens apresentam resultados aceitáveis para a aplicação. Mesmo com um intervalo de confiança de 90 % a variação dos limites do intervalo não ultrapassam 10 *cm* do erro médio.

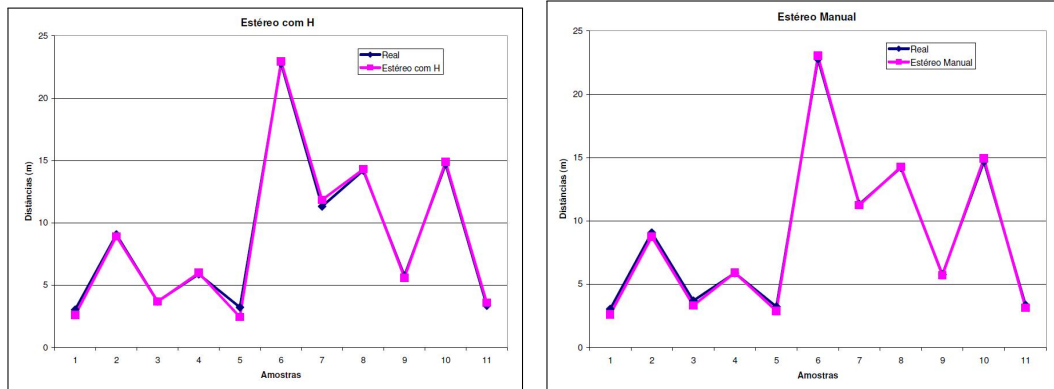


Figura 5.15: Essas imagens fazem uma comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando homografia para os pontos correspondentes. A imagem a direita compara as distâncias estimadas com pontos correspondentes selecionados manualmente.

Entretanto, observa-se uma diferença na variação do intervalo de confiança. O intervalo de confiança do erro médio das distâncias estimadas utilizando a homografia para estimação dos pontos correspondentes entre as imagens é cerca de 3 *cm* maior do que do intervalo de confiança do erro médio das distâncias com os pontos correspondentes selecionados manualmente.

Tal diferença no intervalo de confiança pode ser pelo fato de que a homografia apresenta melhor precisão entre planos menos alinhados.

Foi também realizado a estereoscopia alterando-se o posicionamento e a distância entre as duas câmeras (Figura 5.16) (*baseline*) com o intuito de verificar a robustez da matriz homografia entre as imagens. A Figura 5.17 e Figura 5.18 mostra, respectivamente, o resultado obtido utilizando-se pontos correspondentes selecionados manualmente e pontos correspondentes estimados através da homografia entre as imagens.

A tabela 5.5 mostra o erro das distâncias estimadas pelo sistema estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente e pelo sistema estéreo utilizando a homografia para estimação de pontos correspondentes a partir de ângulos e distância distintas, com longo *baseline*.

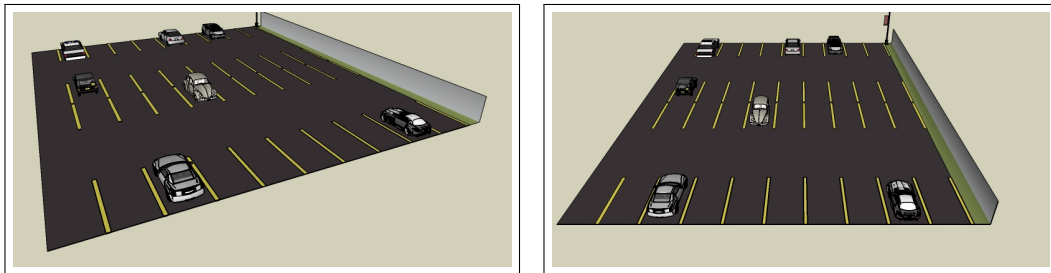


Figura 5.16: Esta figura mostra as imagens utilizadas para realização do sistema estéreo. A imagem a esquerda é a imagem do lado esquerdo do par estéreo e a imagem a direita é a imagem do lado direito do par estéreo.

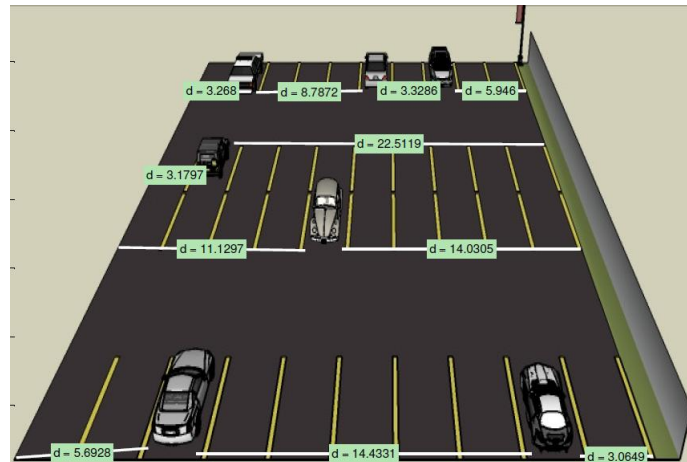


Figura 5.17: Esta imagem mostra as distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com longo *baseline*.



Figura 5.18: A imagem mostra as distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com homografia para estimação dos pontos correspondentes para o cálculo da triangulação.

Tabela 5.5: *Erro das Distâncias Estimadas pela Visão Estéreo com baseline longo*

<i>Real (m)</i>	Estéreo (m)	Erro (m)	Estéreo com H (m)	Erro (m)
3.04	3.26	0.22	2.92	0.12
9.07	8.78	0.29	8.85	0.22
3.7	3.32	0.38	3.43	0.27
5.9	5.94	0.04	5.87	0.03
3.24	3.17	0.07	3.15	0.09
22.77	22.51	0.26	22.44	0.33
11.33	11.12	0.21	11.42	0.09
14.21	14.04	0.17	14.06	0.15
5.78	5.69	0.09	5.62	0.16
14.69	14.43	0.26	14.5	0.19
3.37	3.06	0.31	3.07	0.3
Erro médio:		0.21	Erro médio:	0.18

Foram calculados alguns dados estatísticos dos erros do sistema estéreo com pontos selecionados manualmente conforme os dados da Tabela 5.5. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 %, $\sigma^2 = 0.0104$, $\sigma = 0.1022$. Foram obtidos os seguintes limites, **limite inferior = 0.1584** e **limite superior = 0.2598**.

Foram calculados alguns também dados estatísticos dos erros do sistema estéreo com pontos de correspondência estimados pela homografia entre as imagens conforme os dados da Tabela 5.5 para os erros do sistema estéreo com homografia entre imagens. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 %, $\sigma^2 = 0.0082$, $\sigma = 0.0906$. E foram obtidos o **limite inferior = 0.1324** e **limite superior = 0.2222**.

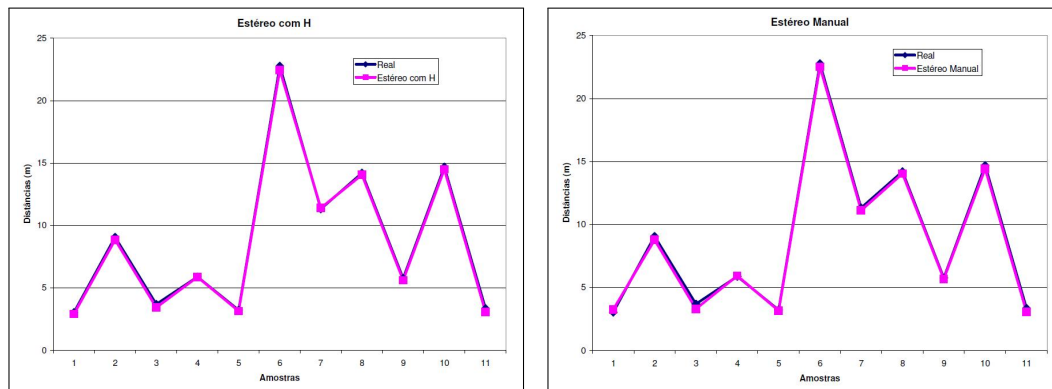


Figura 5.19: Essas imagens fazem uma comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando homografia para os pontos correspondentes. A imagem a direita compara as distâncias estimadas com pontos correspondentes selecionados manualmente.

A Figura 5.19 faz uma comparação entre as distâncias estimadas tanto com pontos correspondentes selecionados manual quanto utilizando a homografia. Observa-se um alto nível de precisão das distâncias estimadas com ambas as maneiras utilizadas para os pontos correspondentes.

As distâncias estimadas utilizando o par de imagens da Figura 5.16, que possui *baseline* longo, mostraram-se mais precisas (Figura 5.19) e com limites de intervalos de confiança menores. Uma suposição viável é que talvez exista um intervalo onde mesmo com *baseline* longa, mas com a sobreposição no campo de visão de ambas as câmeras utilizadas para o sistema estéreo pode-se obter resultados precisos.

A suposição citada deverá ser estudada em um trabalho futuro. Onde, buscar-se-a técnicas que com longas *baseline* no sistema estéreo realizam com precisão estimativas de pontos tridimensionais.

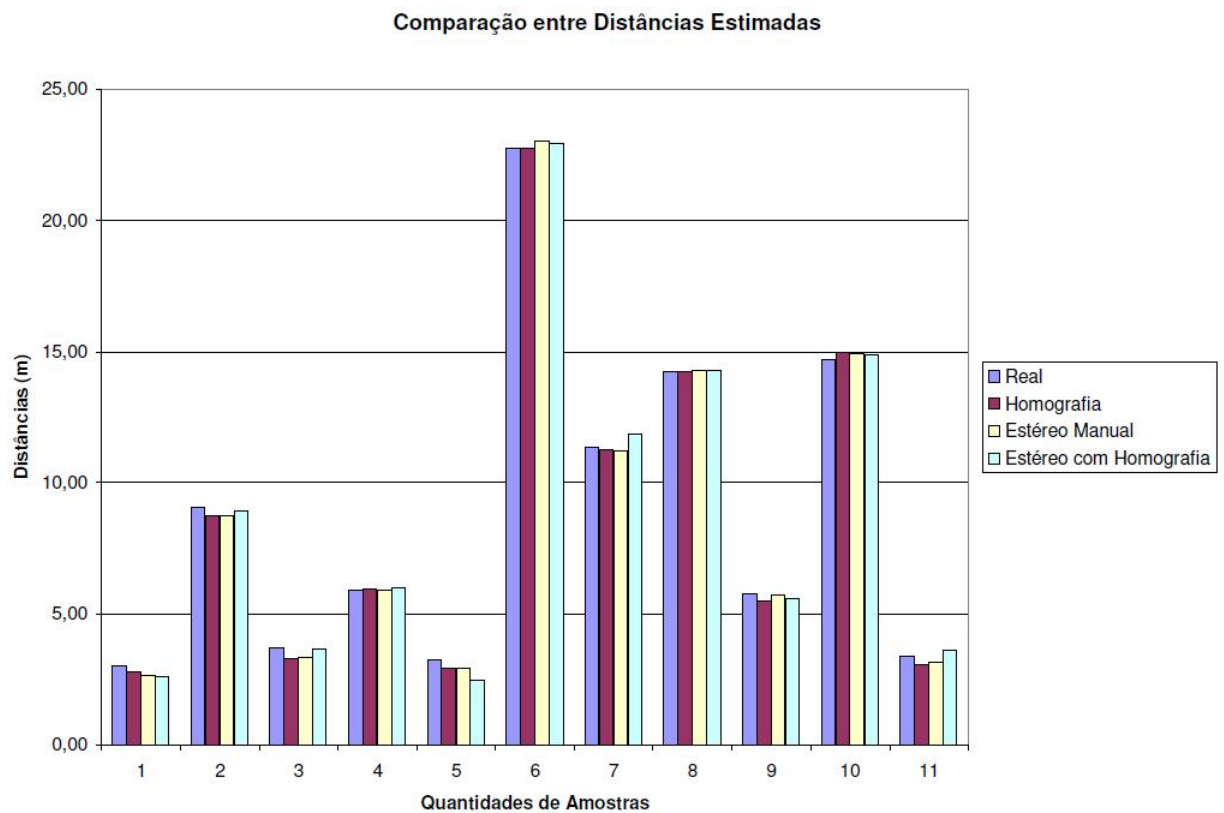


Figura 5.20: Este gráfico realiza uma comparação entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. Foram utilizadas as distâncias da mesma região na cena com todas as 11 distâncias estimadas.

O processo de calibração estéreo utilizado é o mesmo apresentado por Tsai (1987), Zang (1999) e implementado em *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouguet, 2008), onde se considera que a geometria do sistema não é alterada com o tempo. Com isso, os parâmetros *intrínsecos* do sistema estéreo também permanecerá inalterado. Já os parâmetros *extrínsecos* do sistema estéreo são obtidos como apresentado em Trucco e Verri (1998) (ver Equação 4.6).

A implementação em *Camera Calibration Toolbox for Matlab* também possui uma função chamada *rodrigues* que transforma a matriz de rotação R em vetor de rotação ou *vice-versa*. Para mais detalhes sobre o fundamento teórico do processo de calibração implementado em *Camera Calibration Toolbox for Matlab* ver em Zang (1999); Heikkila (1997); Clarke (1998) e Brown (1971).

O procedimento de triangulação utilizado foi o implementado em *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Portanto, como observado em Bouguet (2008) a função *MATLAB stereo_triangulation* tem como parâmetros pontos correspondentes nas imagens, matrizes de rotação e translação do sistema estéreo, e os parâmetros intrínsecos de ambas as câmeras.

Como já observado em Bouguet (2008) e Trucco e Verri (1998) a triangulação é realizada através da interseção das duas retas tridimensionais formadas entre os pontos correspondentes. E como em todas as maneiras abordadas para cálculo da distância, utiliza-se a distância euclidiana entre os pontos reconstruídos.

A Figura 5.20 mostra uma análise comparativa entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. O eixo x são as 11 distâncias estimadas por todos os métodos (homografia, estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente e estéreo com pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens). O eixo y tem-se as distâncias estimadas pelas três maneiras citadas.

Observa-se no gráfico da Figura 5.20 que a variação das distâncias estimadas pelos métodos são todos bem próximos da distância real. Entretanto a utilização da homografia direta entre plano da imagem e plano da cena apresenta-se relativamente mais constante em suas medidas. A homografia direta entre plano da image e plano da cena, sendo um método mais simples em relação ao demais mostra-se com um alto nível de precisão.

Nas seções seguintes os mesmos procedimentos de experimentação apresentados são repetidos. Mas, o objetivo agora é verificar o comportamento da metodologia com outras informações ruidosas.

5.3 Avaliação Controlada do Modelo em Escala

Esse conjunto de experimentos visa verificar a robustez da metodologia desenvolvida em relação aos ruídos existentes em imagens capturadas do mundo real. Entretanto, neste caso, o mundo real é parcialmente controlado. Por exemplo, o pátio do estacionamento utilizado é um modelo em escala (Figura 5.21) seguindo padrões em relação a distância entre faixas, comprimento das faixas e além de controlar a cor do "asfalto"(ou piso) do estacionamento, o que permite diminuir a captura de informações com ruído.

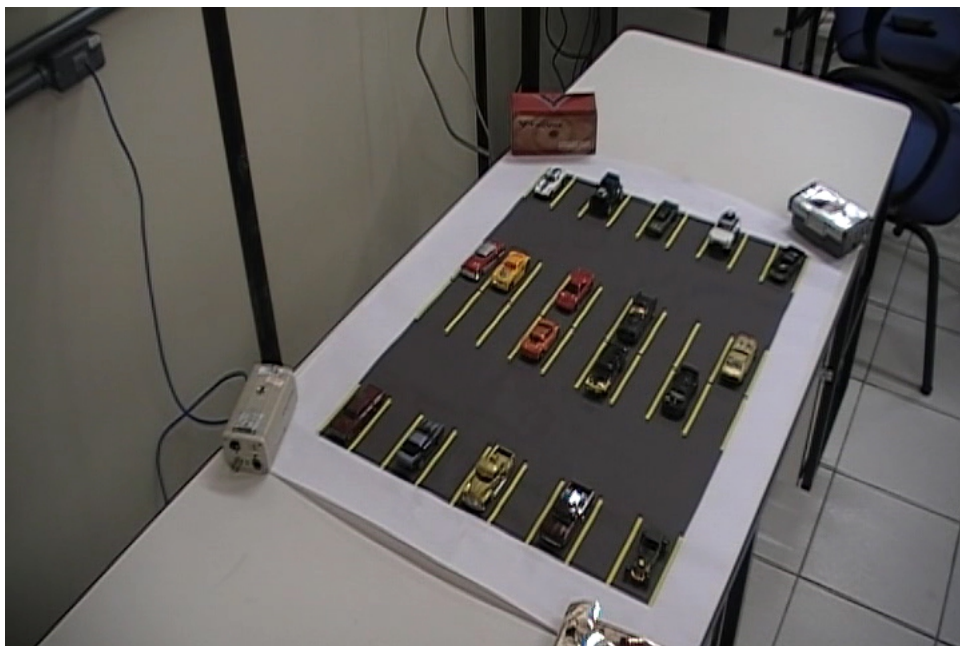


Figura 5.21: Imagem capturada da para detecção de vagas utilizando *corner detection*

A aquisição de imagens controladas foi realizada utilizando câmeras de vídeo com o auxílio de tripés para fixação das câmeras durante os experimentos, como mostrado na Figura 5.22.



Figura 5.22: Esta imagem mostra o arcabouço experimental do modelo controlado em escala. O piso deste modelo, ou seja, as faixas e a cor do asfalto foram impresso em uma folha de tamanho A2 utilizando uma menor escala do modelo sintético desenvolvido.

Para a realização dos experimentos nesta etapa foram selecionados alguns frames do vídeo capturado. Na etapa de experimentação avaliando o modelo sintético já foram verificados a invariância da metodologia de detecção de espaço livre em relação a escala (Figura 5.8) e a rotação (Figura 5.5). Sendo assim, as etapas de experimentação com o modelo controlado e modelo reais não necessitam mais ser verificados em relação a essas variáveis.

5.3.1 Experimento 1 - *Detector de Vagas Utilizando Detector de Características*

O procedimento de detecção de espaço livre utilizando um detector de características é realizado seguindo o mesmo procedimentos apresentado na etapa de experimentação do modelo sintético. As áreas de interesse nas imagens (ou vagas) são previamente definidas manualmente. E então, utiliza-se um detector de características para verificar a presença de objetos nas regiões previamente definidas a procura de espaço livre.

A Figura 5.23 mostra o resultado da detecção de vagas utilizando o detector de espaço livre. Todos os parâmetros (desvio padrão de suavização gaussiana, limiar, tamanho da janela) do algoritmo de detecção de características foram mantidos com os mesmos valores padrão utilizados na etapa de *validação do modelo sintético*.

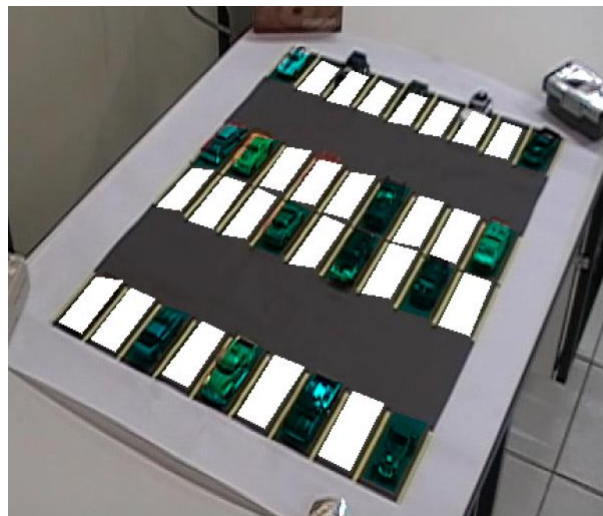


Figura 5.23: Resultado da detecção de veículos utilizando o detector de características nas regiões de interesse. O resultado mostra com sucesso a detecção de espaço livre.

Os resultados obtidos mostram uma taxa de acerto de 86 % para a instância testada. Um dos motivos que podem ter influenciado neste resultado são os ruídos de iluminação da cena e também a capacidade de reflectância dos veículos utilizados no arcabouço experimental controlado. No contexto da aplicação de detecção de vagas consiste em dizer que em um estacionamento com 1000 vagas a classificação de 140 vagas poderiam está classificadas de maneira errada, o que não ajudaria muito.

Mas, ainda é cedo para descartar a metodologia de detecção de espaço livre no contexto de detecção de vaga livre em estacionamento. É válido ressaltar que até o momento nenhum parâmetro do algoritmo de detecção de características foi alterado. Ou quem sabe até mesmo a utilização de algum filtro na imagem que permita destacar os pontos característicos de objetos que estejam na região de interesse possam melhorar os resultados obtidos.

5.3.2 Experimento 2 - Detector de Vagas Utilizando o Detector de Características variando a Iluminação da Cena

O objetivo deste experimento é verificar a precisão do detector de espaço livre utilizando o detector de características sobre a variação de iluminação. O mesmo procedimento do experimento anterior é realizado. A única variável alterada é a iluminação da cena. Foi testado com imagem capturada da cena com pouca luz e com muita luz.

Neste experimento foi alterado a iluminação da cena e observado o resultado do detector de vagas em relação a tais alterações. A Figura 5.24 e Figura 5.25 mostram os resultados após variação de iluminação.

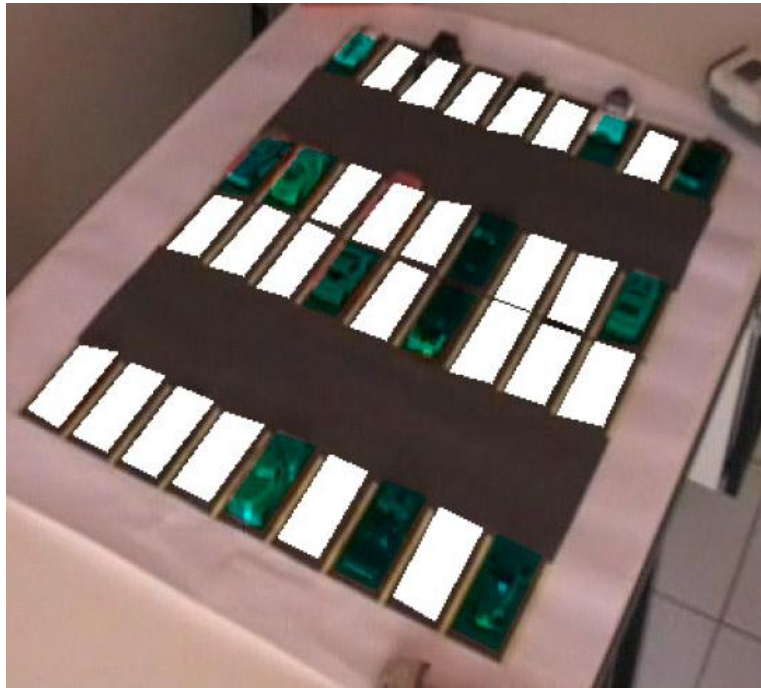


Figura 5.24: Resultado da detecção de veículos utilizando detector de características nas regiões de interesse. Com boa taxa de acerto.

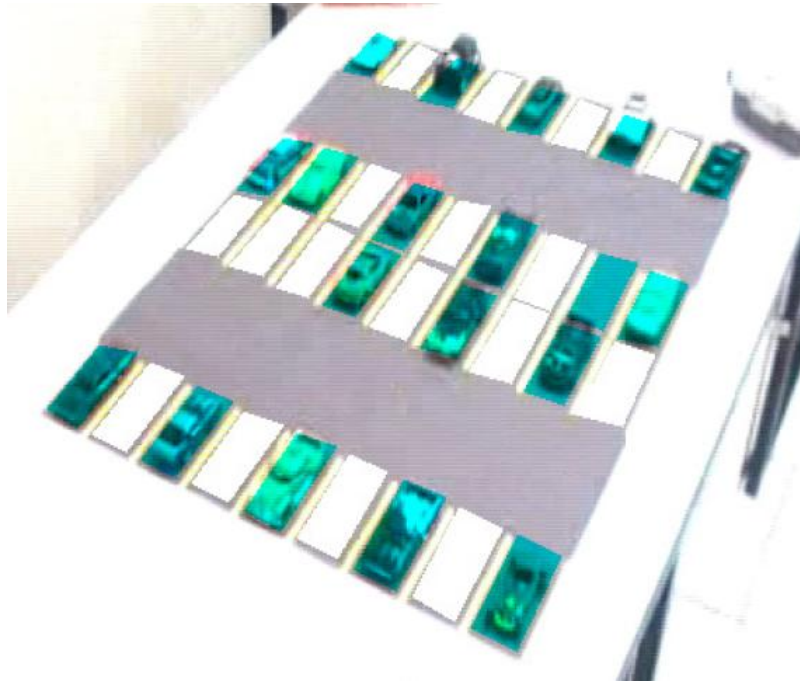


Figura 5.25: Resultado da detecção de veículos utilizando detector de características nas regiões de interesse. Com boa taxa de acerto.

É importante destacar que a variação de iluminação foi apenas realizada apagando e acendendo a lâmpada utilizada no ambiente onde foi montado o arcabouço experimental. A falta de aparado de equipamentos experimentais com relação a variação de iluminação pode sim ter também influência no resultado obtido.

Observa-se resultados interessantes. Na Figura 5.24 a cena tem pouca luz. O que torna difícil para o algoritmo *corner detection* detectar as regiões de variação de intensidade. Já na Figura 5.25, imagem com muito brilho, observa-se um alto nível de acerto. Isso poderia indicar que bastaria a utilização de algum filtro, por exemplo filtro *gaussiano*, para realçar na imagem

pontos característicos antes de utilizar o *corner detection* para melhorar o nível de acerto.

Entretanto, deve-se considerar que as imagens capturadas são de cenas controladas e isso também tem interferência direta na precisão do resultado. Na etapa de *avaliação operacional* mais comentários sobre tal fato são discutidos, por exemplo: seria bom a utilização do filtro gaussiano para realçar os pontos característicos detectados pelo algoritmo de detecção de características, que a base da metodologia de detecção de espaço livre?.

5.3.3 Experimento 3 - *Detector de Vagas Utilizando Homografia*

Este experimento consiste em detectar vaga livre no estacionamento através da distância estimada entre veículos ou quaisquer outros objetos na cena, assim como na etapa de avaliação do modelo sintético. Calcula-se a matriz de homografia H entre o plano do estacionamento e o plano da imagem. Para criação desta matriz, são necessários no mínimo quatros pontos conhecidos no referencial do mundo.

Para construção da matriz de homografia foi utilizado o algoritmo *Direct Linear Transformation - DLT* apresentado no Capítulo 2 desta dissertação. Os pontos correspondentes utilizados em ambos os planos são os apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: *Pontos usados para Construção da Homografia*

Mundo Real (cm)		Imagem (pixel)	
X	Y	x	y
0	0	319	241
0	62.3	126	410
45.1	62.3	189	598
45.1	0	443	481

A Tabela 5.6 mostra os pontos utilizados para construção da matriz de homografia entre os pontos do mundo e pontos da imagem. Ambos estão em seus respectivos sistemas de referência. Os pontos da imagem no sistema de referência em pixel e os pontos da cena estão em um sistema de referência do mundo pre-definido.

A Figura 5.26 mostra as distâncias estimadas utilizando a matriz de homografia construída a partir dos pontos apresentados na tabela 5.6.

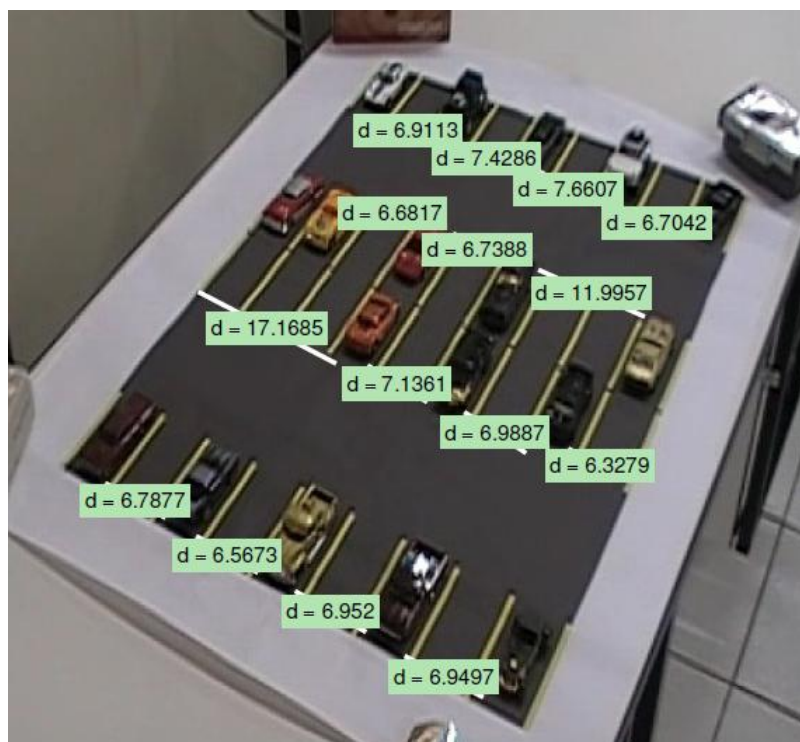


Figura 5.26: A imagem mostra as distâncias estimadas na cena entre regiões/pontos definidos manualmente na imagem.

É importante destacar que o objetivo dos experimentos sobre cena real controlada é o aumento progressivo de informação ruidosa e observar o comportamento da metodologia de detecção de espaço livre, seja através do *cor-*

ner detection, homografia ou visão estéreo. A Tabela 5.7 mostra o erros das distâncias estimadas.

Tabela 5.7: **Erros das Distâncias Estimadas usando Homografia**

<i>Distância Real (cm)</i>	Distância Estimada (cm)	Erro (cm)
6.5	6.9	0.4
6.6	7.4	0.8
6.0	7.6	1.6
6.3	6.7	0.4
6.2	6.6	0.4
6.2	6.7	0.5
11.7	11.9	0.2
16	17.1	1.1
6.7	7.1	0.4
6.8	6.9	0.1
6.1	6.3	0.2
6.6	6.7	0.1
6.7	6.5	0.2
6.8	6.9	0.1
7.0	6.9	0.1
Erro médio:		0.44

A Figura 5.27 mostra uma comparação das distâncias estimadas utilizando a homografia e as distâncias reais. Observa-se também baixa variação do erro. É importante ressaltar que a distância estimada utilizando a homografia entre plano da cena e plano de projeção das imagens pode sofrer erros em relação a proximidade da câmera e na seleção do ponto para cálculo da distância.

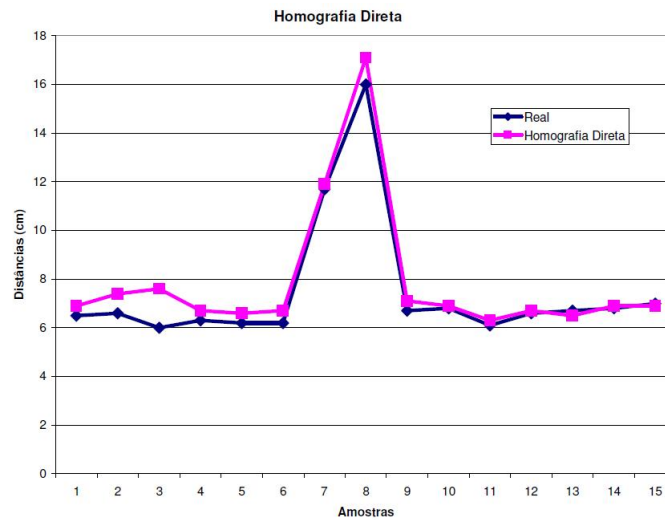


Figura 5.27: A imagem mostra a comparação das distâncias estimadas na cena entre regiões/pontos definidos manualmente e distâncias reais utilizando a homografia.

A Tabela 5.7 mostra os erros das distâncias estimadas pela homografia direta entre plano da cena real controlada e pontos da imagem.

Foram calculados alguns dados estatísticos obtidos sobre os dados da Tabela 5.7. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 %, $\sigma^2 = 0.1704$, $\sigma = 0.4128$. Os limites obtidos são **limite inferior = 0.2647** e **limite superior = 0.6153**.

Os resultados da detecção de espaço livre por meio da distância estimada através de homografia mostram-se aceitáveis, com erro médio das distâncias de 44 cm, baixa variância e com limite de confiança variando em torno de no máximo 20 cm.

Essas medidas também podem variar alguns centímetros devido a seleção manual dos pontos na imagem. Se pelo menos um dos pontos selecionados variar alguns pixels onde realmente deveria ser selecionado o erro da distância

estimada será diretamente afetado. Um trabalho que se propoe em estudar o erro da homografia é o proposto por Criminisi et al. (1997).

No contexto da aplicação de detecção de vagas por meio da distância estimada pela homografia, mostra-se até o momento uma solução viável a ser implantada em uma rede de câmeras distribuídas no estacionamento cobrindo toda a área com o objetivo de verificar distâncias entre objetos para detecção de vagas livres.

5.3.4 Experimento 4 - *Detector de Vagas Utilizando Visão Estéreo*

A aquisição das imagens foi realizada segundo as restrições já definidas nos procedimentos experimentais. Ou seja, duas câmeras com posição (X_1, Y_1, Z_1) e (X_2, Y_2, Z_2) com sobreposição em seus campos de visão capturaram imagens para cálculo dos parâmetros extrínsecos do sistema estéreo. Um requisito para o cálculo dos parâmetros extrínsecos do sistema estéreo é que ambas as câmeras do par estéreo já tenham sido calibradas sobre os mesmos pontos referenciais da cena. Com isso os parâmetros intrínsecos do sistema estéreo são os mesmos da calibração de cada câmeras, porque considera-se o posicionamento fixo de ambas as câmeras. A *baseline* entre as câmeras é de aproximadamente 40 *cm*.

Esse experimento consiste da utilização de visão estéreo para estimar as distâncias entre quaisquer objetos e veículos no estacionamento. Este experimento está dividido em duas etapas. Na primeira etapa, os pontos correspondentes entre as duas imagens utilizadas para realização do estéreo são selecionados manualmente. Já na segunda etapa, a correspondência entre os pontos é realizada através da homografia entre ambas imagens (Figuras 5.28).

Esse experimento consiste na utilização de visão estéreo para estimar as distâncias entre quaisquer objetos e veículos no estacionamento, assim como na etapa de *avaliação do modelo sintético*. Este experimento está dividido

em duas etapas. Na primeira etapa, os pontos correspondentes entre as duas imagens utilizadas para realização da reconstrução tridimensional são selecionados manualmente. Já na segunda etapa, a correspondência entre os pontos é realizada através da homografia entre ambas imagens (Figuras 5.28).

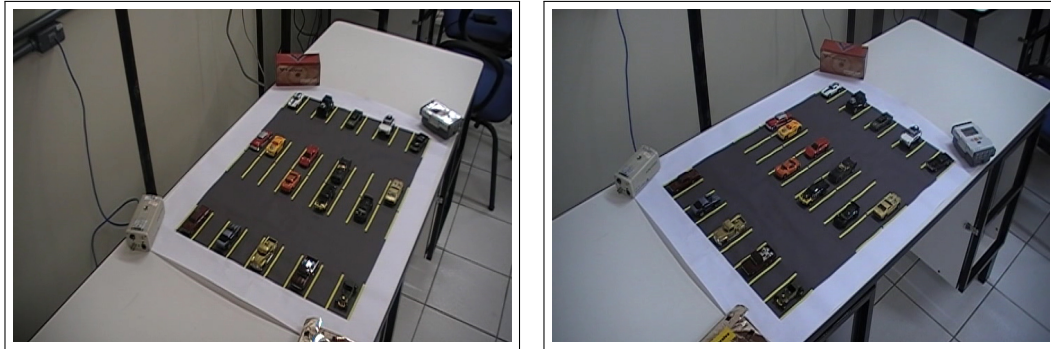


Figura 5.28: Esta figura mostra o par de imagens estéreo utilizado para obtenção das distâncias na cena. A imagem a direita é a imagem do lado esquerdo e a imagem a esquerda é a imagem do lado direito do sistema estéreo.

A Figura 5.29 mostra o resultado da utilização da visão estéreo no processo de estimação da distância entre pontos na cena do estacionamento. A Figura 5.30 mostra o resultado da utilização da visão estéreo, utilizando homografia para realizar a correspondência entre os pontos, no processo de estimação da distância.

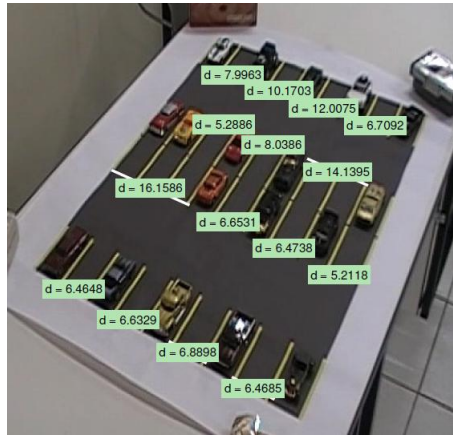


Figura 5.29: A imagem mostra as distâncias estimadas em seus respectivos pontos de correspondência selecionados manualmente para o processo de triangulação.

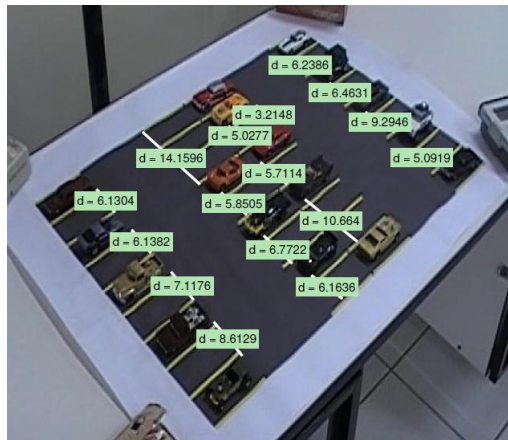


Figura 5.30: A imagem mostra as distâncias estimadas utilizando a homografia entre as imagens para os pontos correspondentes utilizados no processo de triangulação.

A tabela 5.8 mostra o erro da distância estimada pelo sistema estéreo utilizando a seleção manual dos pontos de correspondentes e o sistema es-

téreo utilizando homografia para realizar a correspondência entre os pontos nas imagens, no processo de triangulação, pre-requisito para estimação da distância.

Tabela 5.8: *Erros das Distâncias Estimadas usando Visão Estéreo*

<i>Real (cm)</i>	Estéreo (cm)	Erro (cm)	Estéreo com H (cm)	Erro (cm)
6.5	7.9	1.4	6.2	0.3
6.6	10.0	3.4	6.4	0.2
6.0	12.0	6.0	9.2	3.2
6.3	6.7	0.4	5.0	1.3
6.2	5.2	1.0	5.02	1.18
6.2	8.0	1.8	5.7	0.5
11.7	14.0	2.3	10.6	1.1
16.0	16.0	0.0	14.1	1.9
6.7	6.6	0.1	5.8	0.9
6.8	6.4	0.4	6.7	0.1
6.1	5.2	0.9	6.1	0.0
6.6	6.4	0.2	6.1	0.5
6.7	6.6	0.1	6.1	0.6
6.8	6.8	0.0	7.1	0.3
7.0	6.4	0.6	8.6	1.6
Erro médio:		1.24	Erro médio:	0.91

A Tabela 5.8 mostra os erros das distâncias estimadas pelo sistema estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente e sistema estéreo utilizando homografia entre as imagens para os pontos correspondentes

Algo interessante ocorreu nos resultados obtidos nesses experimentos. Observou-se elevado erro médio das distâncias estimadas principalmente nas distâncias estimadas onde os pontos correspondentes foram selecionados manualmente. No caso onde os pontos correspondentes foram selecionados manualmente o erro de uma distância fugiu a uniformidade das distâncias chegando a 6 m, erro considerável no contexto de detecção de vagas.

Uma suposição para esse acentuado erro é a seleção de pontos correspondentes realizada de maneira errada. Não se pode descartar também o acúmulo de erros desde o processo de estimação de pontos na cena por meio da homografia para o procedimento de calibração de câmeras.

Foram calculados alguns dados estatísticos obtidos sobre os dados da Tabela 5.8. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 % em relação as distâncias estimadas utilizando os pontos correspondentes entre as imagens selecionados manualmente. O intervalo de confiança, como já citado, é de 90 %, $\sigma^2 = 2.5024$, $\sigma = 1.5819$. Os limites do intervalo de confiança são **limite inferior = 0.5681** e **limite superior = 1.9119**.

Entretanto, os resultados das distâncias estimadas utilizando homografia para os pontos correspondentes observou-se uma certa uniformidade com uma única alteração do erro na distância estimada (3 m) na mesma região da cena onde o erro da distância estimada utilizando pontos correspondentes manualmente teve 6 m.

Pode-se supor que tanto os erros dos pontos de correspondência entre plano da imagem e plano da cena utilizados para o processo de calibração, erros dos parâmetros de calibração e erro dos pontos correspondentes selecionados contribuíram para a acentuada variação naquela região. Entretanto, serão observados se tais variações de erros serão também obtidos ou até acentuados na etapa de avaliação operacional, onde o nível de ruído dos pontos estimados para o procedimento de calibração é bem maior.

Foram calculados alguns dados estatísticos obtidos sobre os dados da Tabela 5.8. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 % em relação as distâncias estimadas utilizando os pontos correspondentes estimados através da homografia entre as imagens. Com $\sigma^2 = 0.6751$, $\sigma = 0.8216$. Os limites do intervalo de confiança são **limite inferior = 0.5630** e **limite superior = 1.2610**.

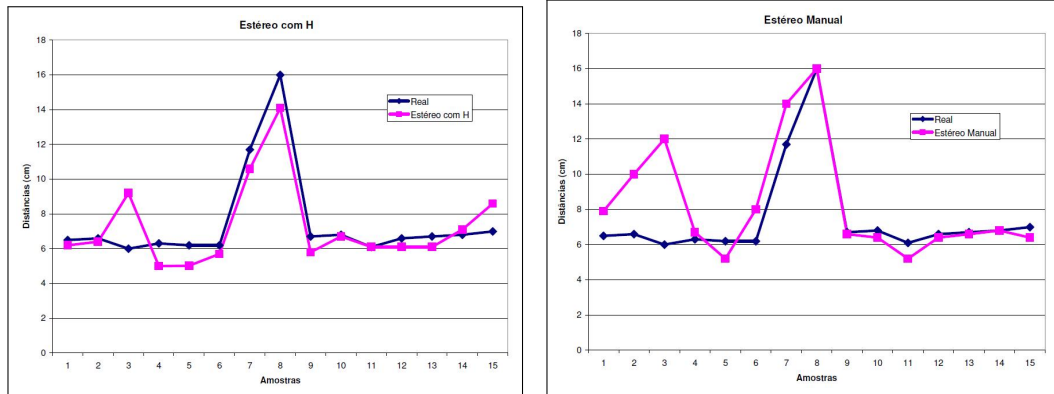


Figura 5.31: Mostra a comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens. A imagem a direita compara as distâncias com os pontos correspondentes selecionados manualmente.

A Figura 5.31 mostra a comparação realizada entre as distâncias estimadas e distâncias reais no modelo controlado. Observa-se que as distâncias possuem baixo erro em ambas maneiras de como os pontos correspondentes foram obtidos.

São necessários a realização de experimentos onde a calibração de câmera é realizada utilizando-se algum padrão com todos os pontos sendo exatamente conhecidos. Tal procedimento é uma sugestão de trabalho futuro realizando-se análise do erro dos parâmetros de calibração em relação aos pontos utilizados para calibração, seja pontos com posição exata ou estimada da cena.

A Figura 5.32 mostra uma análise comparativa entre os métodos utilizados para estimação das distâncias das imagens capturadas do modelo real em escala. O eixo x são as 11 distâncias estimadas por todos os métodos (homografia, estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente

e estéreo com pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens). No eixo y tem-se as distâncias estimadas pelos três métodos citados.

Observa-se no gráfico da Figura 5.32 que a variação das distâncias estimadas pelos métodos são todos próximos da distância real, com apenas duas variações acentuadas. Entretanto a utilização da homografia direta entre plano da imagem e plano da cena apresenta-se relativamente mais constante em suas medidas. A homografia direta entre plano da image e plano da cena, um método mais simples em relação ao demais mostra-se constante com um alto nível de precisão.

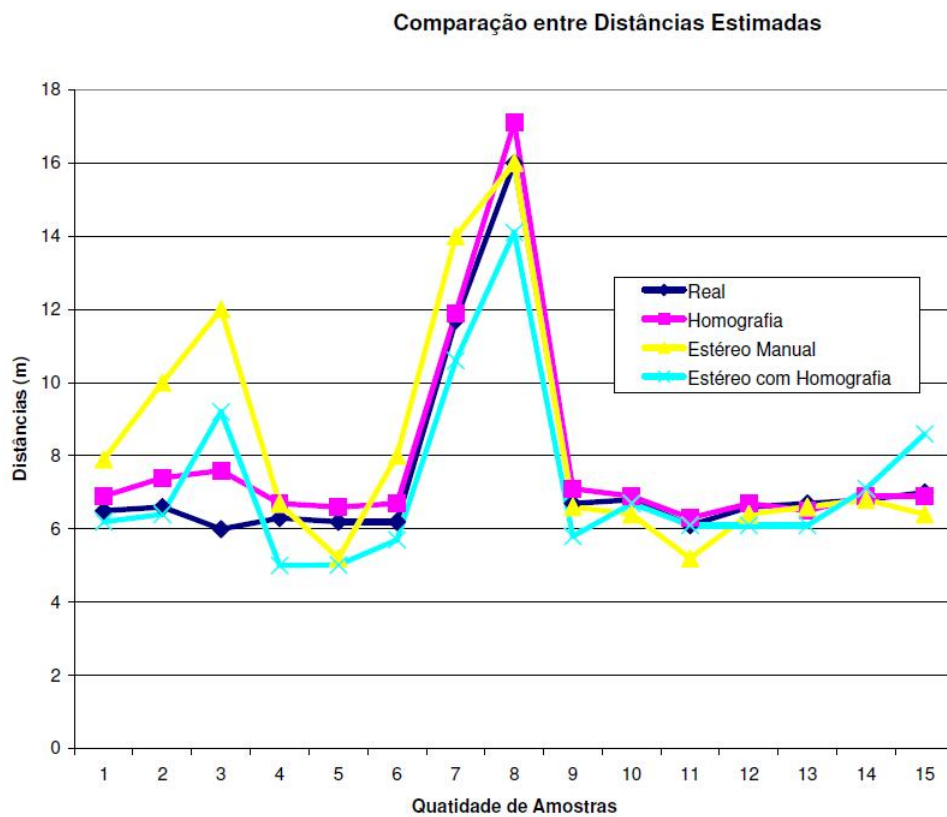


Figura 5.32: Este gráfico realiza uma comparação entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. Foram utilizadas as distâncias da mesma região na cena com todas as 11 distâncias estimadas.

5.4 Avaliação Operacional

Esta etapa de experimentação a metodologia de detecção e estimação de espaço livre em estacionamento é testada em uma cena real sem nenhuma intervenção. O resultado dessa avaliação operacional além de verificar a robustez da metodologia desenvolvida, permite observar estimativas de distâncias sobre valores do sistema de coordenadas do mundo real sem variações.

A aquisição de imagens real foi realizada utilizando câmeras de vídeo com o auxílio de tripés para fixação das câmeras durante a filmagem. Para a realização dos experimentos nesta etapa foram selecionados alguns frames do vídeo capturado, assim como na etapa de procedimentos do modelo controlado.

5.4.1 Experimento 1 - *Detector de Vagas Utilizando o Corner Detection*

Esse experimento consiste em verificar a robustez do detector de vagas utilizando o detector de características em imagem de cena real. Esse experimento foi realizado de duas maneiras. Primeira, foi utilizado o detector de características com os seus parâmetros padrão (desvio padrão de suavização gaussiana = 2, limiar = 20, tamanho da janela = 3), conforme utilizado nas etapas de experimentos anteriores. Segunda, utilizando também o detector de características alterando-se o parâmetro limiar = 200, permanecendo com os valores dos demais parâmetros. Tal alteração no limiar é realizada devido as várias informações ruidosas da cena.

A Figura 5.33 mostra a imagem da cena que foi utilizada para realização deste experimento. A Figura 5.34 e Figura 5.35 são, respectivamente, imagem de entrada e imagem do resultado utilizando a metodologia de detecção espaço livre com o detector de características com os parâmetros padrão.



Figura 5.33: Imagem da cena do mundo real onde foram capturadas as imagens para a avaliação operacional tanto utilizando o detector de características para detecção de espaço livre, como também utilizando as técnicas de estimação de distâncias.



Figura 5.34: Imagem de entrada para a metodologia de detecção de vagas utilizando o detector de característica com os seus parâmetros padrão.

Como já citado, esta etapa da experimentação consiste em analisar o comportamento da metodologia de detecção de espaço livre em imagens com altos níveis de ruídos. Observa-se nas imagens capturadas da cena real de um estacionamento, além dos ruído já inerentes a cenas reais, como por exemplo, iluminação, reflectância dos objetos e outros, observa-se também manchas de óleo no piso do estacionamento, a irregularidade do plano do estacionamento, sombras de árvores entre outros.



Figura 5.35: Resultado da metodologia de detecção de vagas utilizando a metodologia de detecção de espaço livre com detector de característica com os parâmetros padrão.

O resultado obtido utilizando a metodologia de detecção de espaço livre com o detector de características sem alteração em seus parâmetros observa-se erro de classificação devido ruídos de mancha de óleo no piso do estacionamento ou até mesmo devido sinalizações de vagas reservadas para deficientes físicos.

A idéia adotada para que o detector de espaço livre não classifique qualquer mancha de óleo, sombra de árvore ou sinalização de trânsito pintadas no piso do estacionamento de maneira errônea é a alteração no limiar do algoritmo de detecção de características *corner detection - harris*.

Tal limiar define um nível base de autocorelação. Em outras palavras, se o valor de autocorelação de um ponto na imagem for maior que o limiar estabelecido, tal ponto será considerado um ponto de interesse ou um ponto que agrega alguma característica relevante.

As Figuras 5.36 e Figura 5.37 são, respectivamente, imagem de entrada e imagem do resultado utilizando a metodologia de detector de vagas utilizando o detector de característica alterando-se o limiar $= 200$.

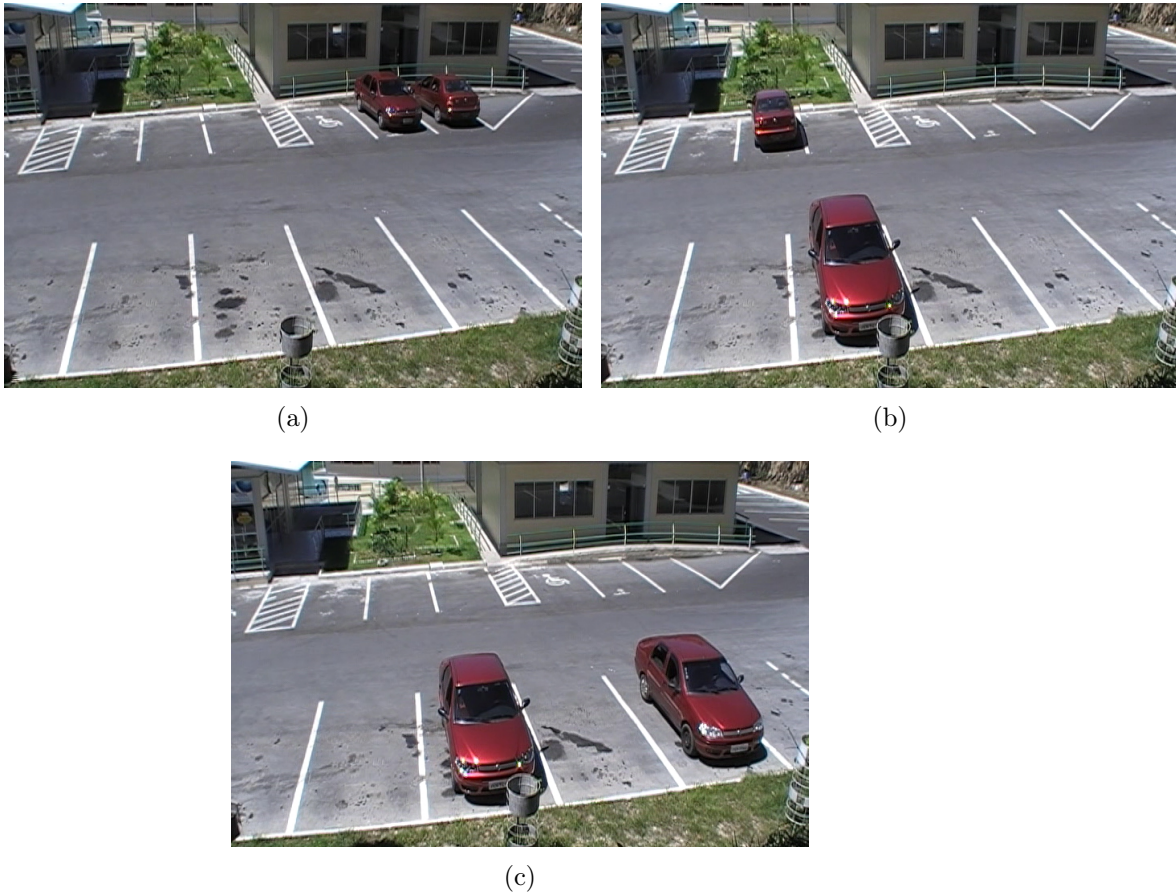


Figura 5.36: As imagens de (a) a (c) são as imagens de entrada para a metodologia de detecção de vagas utilizando o detector de espaço livre com detector de característica sem alteração em seus parâmetros.

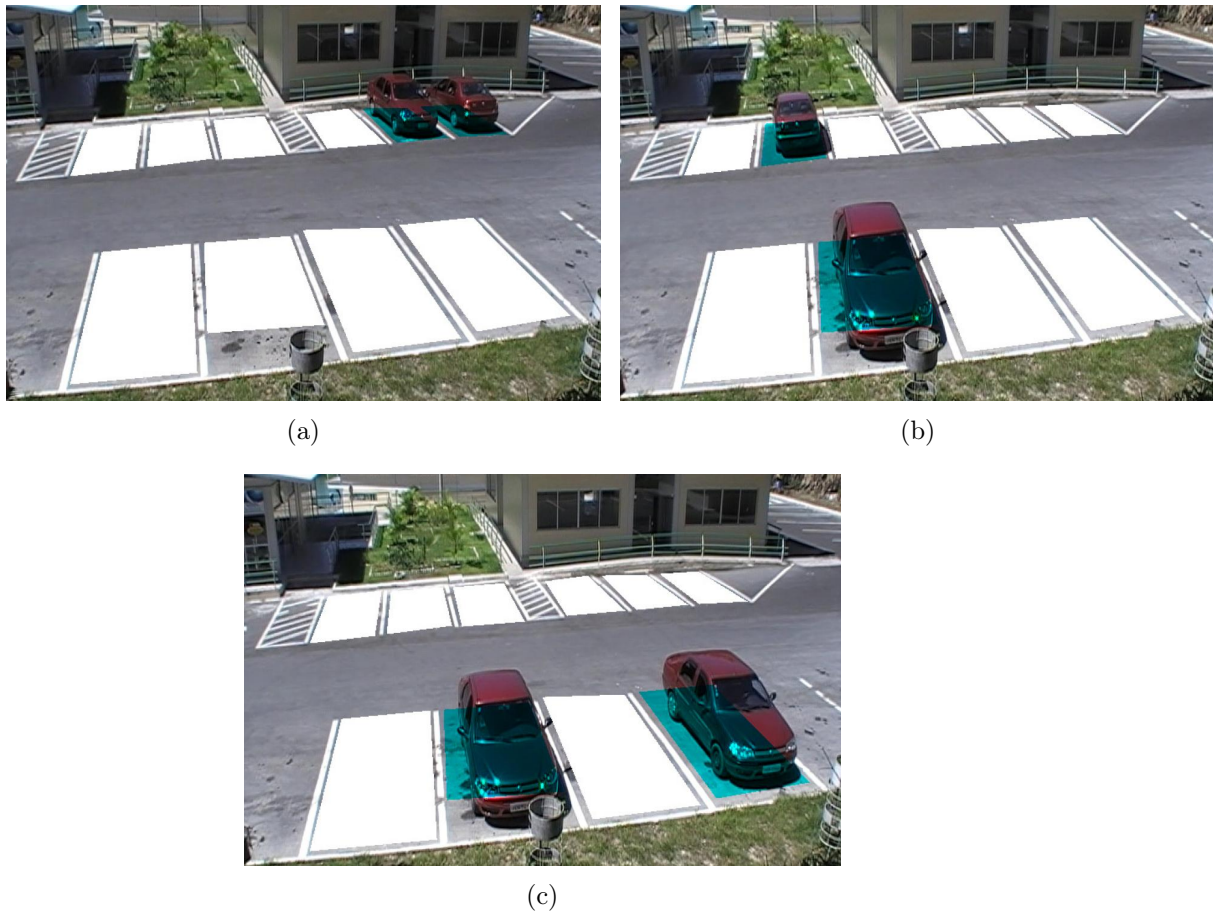


Figura 5.37: As imagens de (a) a (c) são os resultados das imagens de entrada das Figuras 5.36 utilizando a metodologia de detecção de vagas com a utilização do detector de característica alterando-se o limiar = 200.

As regiões de cor branca nas Figuras 5.35 e Figuras 5.37 representam as vagas livres e as regiões de cor verde transparente representam as vagas ocupadas. Observou-se alta taxa de acerto nas imagens da Figura 5.37 utilizando o limiar = 200.

O resultado obtido alterando-se o limiar do algoritmo *corner detection - harris* foi conforme esperado. Em imagens com um nível elevado de informação ruidosa deve-se apenas considerar pontos de interesse ou pontos característicos aqueles com valores de autocorrelação não tão sensíveis.

Para a implantação desta metodologia algumas restrições em relação ao posicionamento da câmera com pouca ou nenhuma sobreposição de objetos devem ser considerados. E também devem ser realizados experimentos em relação a questão da quantidade de luz, simulando por exemplo imagens capturadas durante a noite.

5.4.2 Experimento 2 - *Detector de Vagas Utilizando Homografia*

Este experimento objetiva detectar vaga livre no estacionamento através da distância estimada entre veículos ou quaisquer outros objetos na cena, assim como nas etapas anteriores. Calcula-se a matriz de homografia H entre o plano do estacionamento e o plano da imagem. Para criação desta matriz, são necessários no mínimo quatros pontos conhecidos no referencial do mundo.

Para construção da matriz de homografia foi utilizado o algoritmo *Direct Linear Transformation - DLT* apresentado no Capítulo 2 desta dissertação. Os pontos utilizados são os apresentados na tabela 5.9.

Tabela 5.9: *Pontos Usados para Construção da Homografia*

Mundo Real (m)		Imagem (pixel)	
X	Y	x	y
0	0	462	79
0	12.63	146	157
9.81	12.63	129	436
9.81	0	383	695

Para a obtenção dos quatro pontos utilizados para construção da homografia um requisito é a definição do sistema de referência da cena. Foram realizadas medições utilizando-se fita métrica de áreas da cena para definição tanto dos quatro pontos para a homografia quanto para as distâncias entre veículos e outros objetos na cena. Os pontos da Tabela 5.9 estão conforme o sistema de referência predefinido na cena.

A Figura 5.38 mostra as distâncias estimadas utilizando a matriz de homografia construída a partir dos pontos apresentados na tabela 5.9.

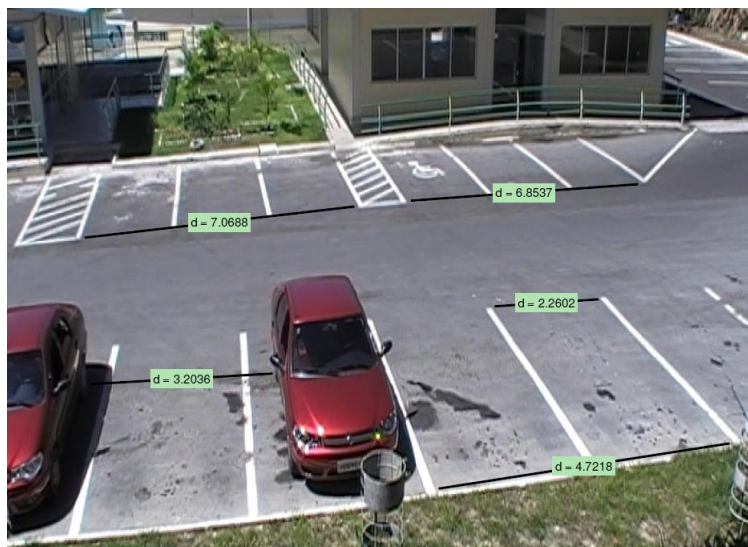


Figura 5.38: Distâncias estimadas utilizando-se a matriz de homografia

É importante destacar que o objetivo dos experimentos sobre cena real, sem nenhuma intervenção na cena, é observar o comportamento da metodologia de detecção de espaço livre, seja através do *corner detection - harris*, homografia e visão estéreo. A Tabela 5.10 mostra o erro das distâncias estimadas.

Tabela 5.10: *Erro das Distâncias Estimadas usando Homografia*

<i>Distância Real (m)</i>	Distância Estimada (m)	Erro (m)
7.33	7.06	0.27
7.33	6.85	0.48
3.33	3.2	0.13
2.37	2.26	0.11
4.85	4.72	0.13
Erro médio:		0.22

Foram calculados alguns dados estatísticos obtidos sobre os dados da Tabela 5.10. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 % de certeza, $\sigma^2 = 0.0698$, $\sigma = 0.2643$. Os limites do intervalo de confiança são **limite inferior = 0.0296** e **Limite Superior = 0.4184**.

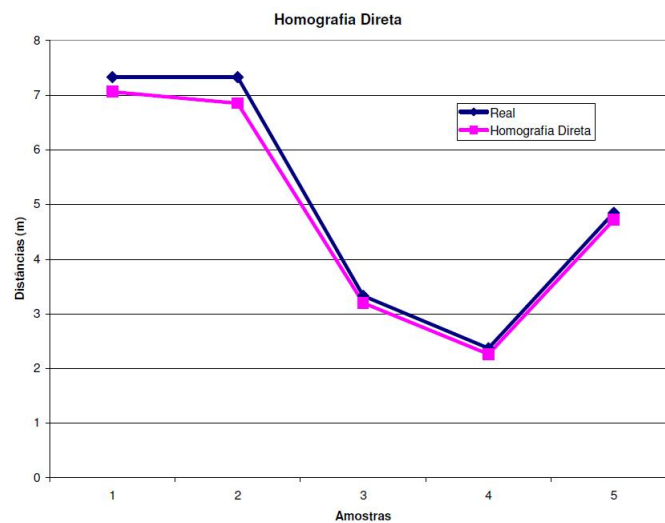


Figura 5.39: Mostra uma comparação entre as distâncias estimadas utilizando a homografia e a distâncias reais adquiridas por medição na cena.

A Figura 5.39 mostra uma comparação das distâncias estimadas utilizando a homografia direta entre plano da imagem e plano de projeção da imagem com as distâncias reais coletadas da cena. As distâncias estimadas possuem pouco erro em relação às distâncias reais coletadas da cena.

Ainda nesta etapa de experimentação sem nenhum controle sobre informações ruidosas da cena, as distâncias estimadas utilizando a homografia direta entre plano da imagem e plano da cena mostram-se com aceitáveis variações de erros, com pouca variação nos limites do intervalo de confiança, em torno de 21 cm, do erro médio e com variância e desvio padrão também baixos.

A restrição dessa abordagem está na instância onde as cenas não possuem piso com pouca variação em seu plano.

5.4.3 Experimento 3 - *Detector de Vagas Utilizando Visão Estéreo*

Como forma de mostrar a precisão da homografia utilizou-se dois procedimentos diferentes para correspondência entre pontos nas imagens. Um procedimento onde os pontos correspondentes são selecionados manualmente e um outro que os pontos correspondentes são estimados utilizando-se a homografia entre as imagens.

Esse experimento consiste da utilização de visão estereo para estimar as distâncias entre quaisquer objetos e veículos no estacionamento, assim como nas etapas anteriores. Este experimento está dividido em duas etapas. Na primeira etapa, os pontos correspondentes entre as duas imagens utilizadas para realização do estereo são selecionados manualmente. Já na segunda etapa, a correspondência entre os pontos é realizada através da homografia entre ambas imagens (Figuras 5.40).



Figura 5.40: As imagens foram utilizadas para determinação do sistema estéreo. A imagem (a) é a imagem do lado esquerdo e a imagem (b) é a imagem do lado direito do sistema estéreo.

A Figura 5.41 mostra o resultado da utilização da visão estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente para o processo de estimação da distância entre pontos na cena do estacionamento. A Figura 5.42 mostra o resultado da utilização da visão estéreo, utilizando homografia para realizar a correspondência entre os pontos, no processo de estimação da distância.

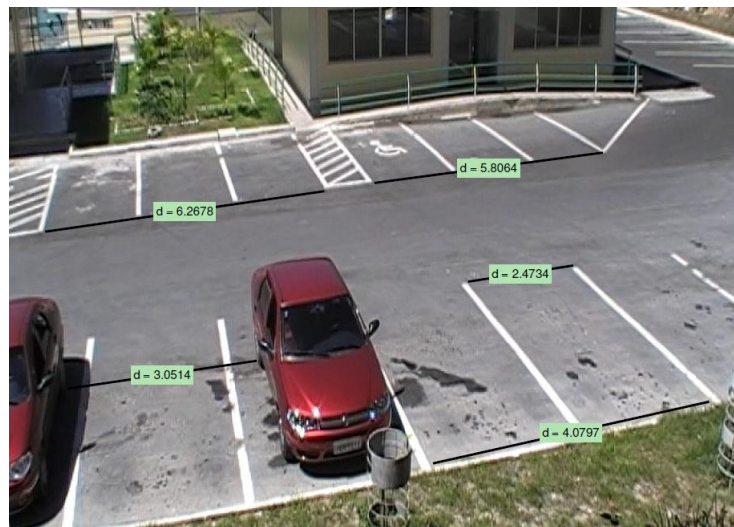


Figura 5.41: Distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo de cena real.

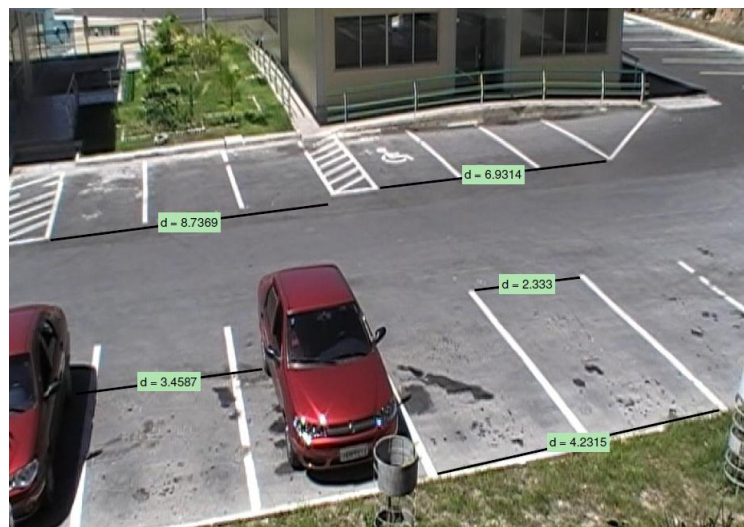


Figura 5.42: Distâncias estimadas utilizando-se visão estéreo com homografia para estimação dos pontos correspondentes.

A tabela 5.11 mostra o erro da distância estimada pelo sistema estéreo com pontos correspondentes selecionados de maneira manual e sistema estéreo utilizando homografia para estimação dos pontos correspondentes entre as imagens.

Tabela 5.11: *Erro das Distâncias Estimadas usando Visão Estéreo*

<i>Real (m)</i>	Estéreo (m)	Erro (m)	Estéreo com H (m)	Erro (m)
7.33	6.26	1.07	8.73	1.4
7.33	5.8	1.53	6.9	0.43
3.33	3.05	0.28	3.45	0.12
2.37	2.47	0.1	2.33	0.04
4.85	4.07	0.78	4.23	0.62
Erro médio:		0.75	Erro médio:	0.52

A Tabela 5.11 mostra o erro das distâncias estimadas pelo sistema estéreo com pontos selecionados manualmente e pelo sistema estéreo utilizando homografia para estimativa dos pontos correspondentes, sendo respectivamente, a segunda e quinta colunas.

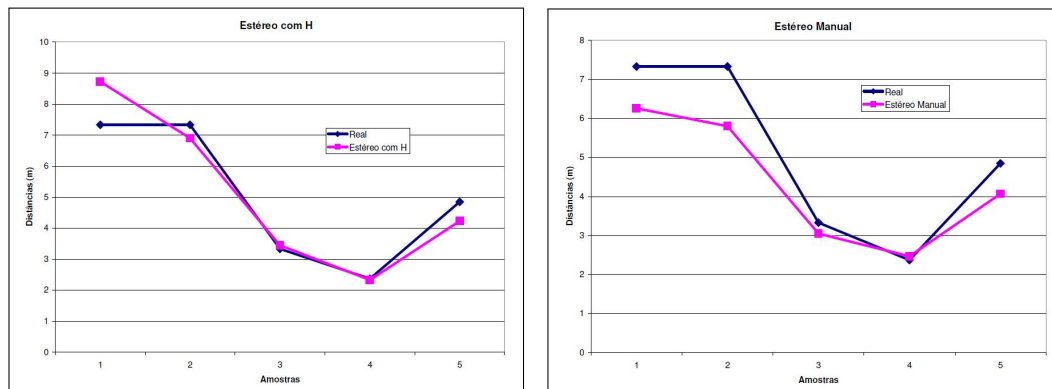


Figura 5.43: Mostra a comparação das distâncias estimadas e distâncias reais. A imagem a esquerda compara as distâncias estimadas utilizando pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens. A imagem a direita compara as distâncias com os pontos correspondentes selecionados manualmente.

A Figura 5.43 mostra a comparação entre distâncias estimadas e distâncias reais no modelo real. Observa-se também a baixa variação do erro sobre as distâncias estimadas, principalmente utilizando a homografia para obtenção de pontos correspondentes.

Nesta etapa de avaliação operacional observam-se bons resultados mesmo com níveis elevados de ruídos nas imagens. Com erro médio das distâncias estimadas não ultrapassando 75 *cm*.

Foram calculados alguns dados estatísticos obtidos sobre os dados da Tabela 5.11. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 % em relação as distâncias estimadas utilizando os pontos correspondentes entre as imagens selecionados manualmente. Foram também calculados a $\sigma^2 = 0.2710$, $\sigma = 0.5206$. Os limites do intervalo de confiança são **limite inferior = 0.3690** e **limite superior = 1.1350**.

Foi também observado a baixa variação dos limites de intervalo de confiança para as distâncias estimadas onde os pontos correspondentes foram selecionados manualmente. Tornando-se também uma técnica aceitável no contexto de uma aplicação de detecção de vaga livre em estacionamento. Como já mencionado, a calibração é realizada utilizando-se pontos estimados entre a homografia entre plano da cena e imagem. Portanto, tais erros podem ter um nível mais elevado de precisão se os pontos da cena foram valores exatos. Mas, tal estudo poderá ser realizado como trabalho futuro.

Foram obtidos alguns dados estatísticos sobre os dados da Tabela 5.11. Foram calculados os limites do intervalo de confiança sobre o erro médio, com um intervalo de confiança de 90 % em relação as distâncias estimadas utilizando os pontos correspondentes estimados utilizando homografia entre as imagens. Foram calculados também a $\sigma^2 = 0.2366$, $\sigma = 0.4864$. Os limites do intervalo de confiança são **limite inferior = 0.1642** e **limite superior = 0.8798**.

Já as distâncias obtidas da triangulação onde os pontos correspondentes foram estimados por meio de homografia entre as imagens foram ainda melhores se comparada em relação ao erro médio das distâncias, não ultrapassando 52 *cm*, também com baixos valores de variância, desvio padrão e também com os limites do intervalo de confiança variando em torno de 40 *cm*, um erro aceitável para o contexto de uma aplicação de detecção de vagas livres em estacionamentos.

É importante destacar que a homografia utilizada para a estimativa de pontos correspondentes neste experimentos foi re-calculada utilizando o método não linear com minimização, *Sampson's* para *geometric reprojection error* Sivic e Zisserman (2003).

A Figura 5.44 mostra uma análise comparativa entre os métodos utilizados para estimação das distâncias das imagens capturadas do modelo real sem nenhum controle. O eixo *x* são as 5 distâncias estimadas por todos os

métodos (homografia, estéreo com pontos correspondentes selecionados manualmente e estéreo com pontos correspondentes estimados pela homografia entre as imagens). O eixo y tem-se as distâncias estimadas em metros pelos três métodos citados.

Observa-se no gráfico da Figura 5.44 que a variação das distâncias estimadas pelos métodos são todos próximos da distância real, com poucas variações. Entretanto a utilização da homografia direta entre plano da imagem e plano da cena apresenta-se relativamente mais constante em suas medidas. Mesmo a homografia direta entre plano da image e plano da cena, sendo um método mais simples em relação aos demais mostra-se constante com um alto nível de precisão.

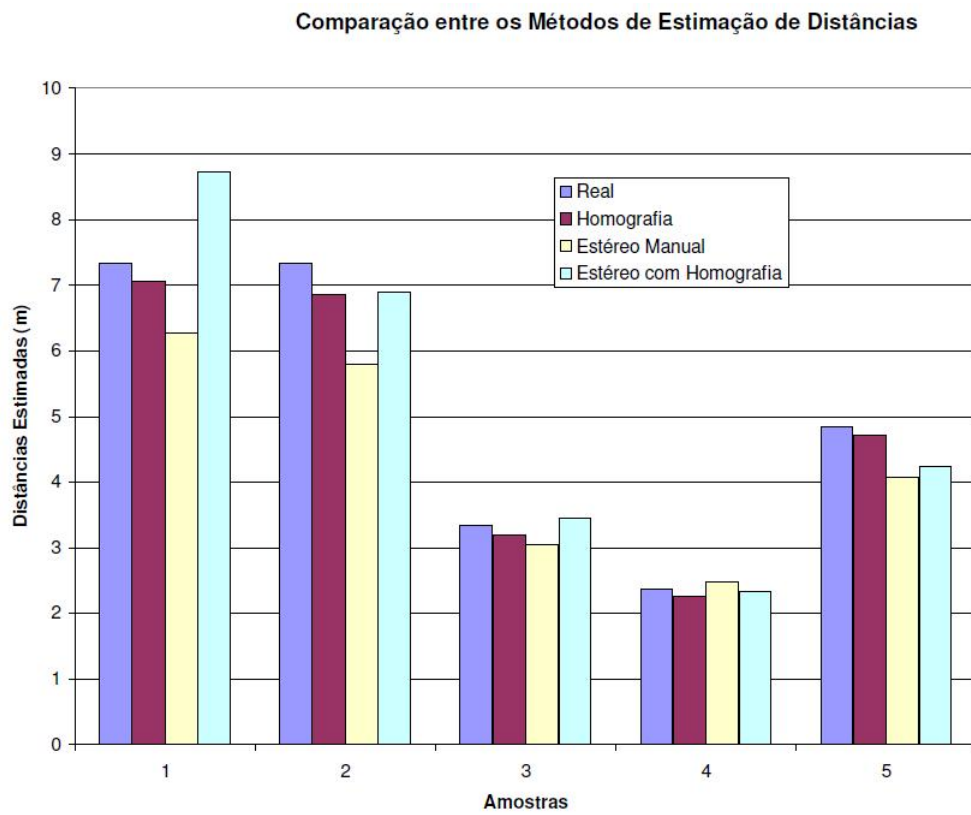


Figura 5.44: Este gráfico realiza uma comparação entre os métodos utilizados para estimação das distâncias. Foram utilizadas as distâncias da mesma região na cena com todas as 5 distâncias estimadas.

Capítulo 6

Conclusão

Esta dissertação desenvolveu uma metodologia para detecção de espaço livre com uma ou mais câmeras distribuídas, utilizando duas técnicas: detector de características e estimação da distância para detecção de espaço livre. O trabalho está contextualizado em uma aplicação de detecção de vagas em estacionamento, com dados obtidos a partir de redes de câmeras em sistemas de circuito interno de TV, pode-se detectar espaço/vagas disponíveis para estacionamento.

Nos resultados obtidos utilizando-se o detector de característica para detecção de pontos de interesse observou-se um alto nível de acertos na classificação. Mesmo com níveis de informações ruidosas elevadas, como nas imagens de cenas reais, a metodologia de detecção de vagas livre/ocupada demonstrou-se eficiente com resultados em torno de 80 % a 100% de taxa de acertos. E a detecção de espaço livre utilizando-se das distâncias estimadas, os resultados também mostram-se satisfatório, porque utilizando-se um intervalo de confiança de 90 %, os limites do intervalo de confiança do erro médio das distâncias estimadas não ultrapassam 10 *cm*, possuindo ainda baixa variância das distâncias estimadas.

Os resultados de detecção de vagas foram obtidos através da repetição da metodologia de detecção de espaço livre, utilizando detector de características, sobre várias instâncias, com a inclusão progressiva de ruídos, indo desde

a variação de ruído gaussiano inserido em imagens obtidas do modelo sintético até ruídos inerentes as imagens de uma cena real. Em todas as etapas de experimentação foram selecionados na imagens áreas referentes as vagas de estacionamento. A verificação de espaço livre de dá pela detecção de características presente nas áreas pré-definidas nas imagens.

Assim como nos resultados de detecção de vagas utilizando detector de características, a estimação de distância para detecção de espaço livre foi também obtida segundo as três etapas de experimentação. Neste caso, são estimadas distâncias entre pontos selecionados por um operador humano não sendo necessário pre-definir as áreas de interesse.

Alguns problemas foram enfrentados durante o desenvolvimento deste trabalho, destacam-se os seguintes: a complexidade da ferramenta de construção do modelo sintético; a complexidade teórica da geometria projetiva, a falta de equipamento de medição de iluminação e por fim a dificuldade em encontrar uma cena real para captura de imagens segundo as restrições apresentadas pela metodologia.

Observou-se que a metodologia desenvolvida obteve resultados satisfatórios sobre as instâncias na qual foi experimentada. Entretanto, possui ainda limitações, como por exemplo: quanto a iluminação, o módulo de detecção de espaço livre utilizando detector de característica torne-se inviável. Tanto para nível de iluminação muito alto ou muito baixo. O detector de características utilizado quase não diferenciará as variações de autocorrelação para cada pixel, portanto não identificando pontos de interesse. Outra limitação, agora em relação a metodologia de estimação de distâncias é que existem muitos estacionamentos onde o piso (plano da cena) não é regular o suficiente para que possa ser estimado a homografia direta entre os planos da imagem e plano da cena, elevando consideravelmente o nível do erro.

6.1 Trabalhos Futuros

Algumas questões observadas durante o processo de experimentação foram consideradas como trabalho para que não houvesse a fuga do objetivo desta dissertação. Tem-se a seguir alguns problemas que são de interesse e podem ser abordados futuramente.

As distâncias estimadas utilizando o par de imagens da Figura 5.16, que possui *baseline* longo, mostraram-se mais precisas e com limites de intervalos de confiança menores. Uma suposição viável é que talvez exista um intervalo onde mesmo com *baseline* longa entre as câmeras mesmo assim pode-se obter resultados precisos. Esta suposição citada deverá ser estudada em um trabalho futuro. Onde, buscar-se-a técnicas que com longas *baseline* no sistema estéreo realizam com precisão estimativas de pontos tridimensionais.

Um outro trabalho futuro está sintetizado na seguinte pergunta: É viável a utilização do filtro gaussiano para realçar pontos característicos detectados pelo algoritmo de detecção de vagas utilizando um detector de características, que a base da metodologia de detecção de espaço livre?.

E por fim, um outro trabalho futuro é a realização de experimentos onde a calibração de câmera é realizada utilizando-se algum padrão com todos os pontos sendo exatamente conhecidos. Tal procedimento é uma sugestão de trabalho futuro realizando-se análise do erro dos parâmetros de calibração em relação aos pontos utilizados para calibração, seja pontos com posição exata ou estimada da cena.

6.2 Considerações Finais

Esta metodologia pode ser implantada em estacionamentos para o controle automático de vagas livres/ocupadas. Essa idéia pode ser integrada a sistemas de rede de câmeras inteligentes.

Esta metodologia é uma solução barata e de possível aplicação em sistemas de segurança internos - no monitoramento de grandes áreas sobre a ótica do empreendedorismo. Essas aplicações fornecem o patenteamento desse produto e a viabilidade comercial do mesmo.

Referências Bibliográficas

- Agarwal, S. e Roth, D. (2002). Learning a sparse representation for object detection. In *ECCV '02: Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part IV*, pages 113–130, London, UK. Springer-Verlag.
- Anderson, E. (1999). *LAPACK User's Guide*, terceira edição edition.
- Bouguet, J. (2008). *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Acessado em 31 Julho de 2009.
- Brown, D. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, pages 855–866.
- Brunnan, D. A. (1998). *Geometry*. Cambridge press.
- C. Schmid, R. M. e Bauckhage, C. (2000). Evaluation of interest point detectors. *International Journal of Computer Vision*, pages 151–172.
- Campos, M. A. (2009). *Avaliação de Desempenho de Sistemas*. Universidade Federal de Pernambuco, <http://www.cin.ufpe.br/mac/ADS/aulas/adsaula5.ppt>.
- Cantão, L. A. P. (2009). *Séries de Taylor e de Maclaurin*. Universidade Paulista - UNESP.
- Carvalho, P. C. P., Szenberg, F., e Gattass, M. (1998). Image-based modeling using a two-step camera calibration method. pages 388–395.
- Clarke, T.A.; Fryer, J. (1998). The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record*, pages 51–66.
- Criminisi, A., Reid, I., e Zisserman, A. (1997). A plane measuring device. In *Proceedings of the 8th British Machine Vision Conference, Colchester, UK*.

- Derpanis, K. G. (2004). The harris corner detector.
- Harris, C. (1988). A combined corner and edge detector. Plessey Research Roke Manor, UK.
- Hartley, R.I. e Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition.
- Heikkila, J.; Silvén, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. Technical report, University of Oulu.
- Honeywell (2005). Vehicle detection using amr sensors. *Microelectronics & Precision Sensors*.
- Matos, I. M. T. (2008). *Álgebra Linear e Geometria Analítica*. Departamento de Engenharia de Eletrônica e Telecomunicações e de Computadores - DEETC, <http://www.deetc.isel.ipl.pt/paginaspessoais/isabelteixeira/Aulas.htm>.
- Moravec, H. (1977). Towards automatic visual obstacle avoidance. In *Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- Nogueira, F. M. (1998). Geração automática de mapas de disparidade em visão estéreo. Master's thesis, Universidade Estadual de Campinas.
- Schneiderman, H. (2000). A statistical approach to 3d object detection applied to faces and cars. pages 0–6.
- Schneiderman, H. e Kanade, T. (2000). A histogram-based method for detection of faces and cars. volume 3, pages 504–507 vol.3.
- Silva, E. A.; Gonzaga, A. (2006). Detecção de veículos em movimento usando modelo de misturas gaussianas e rnas. *ANAIS DO WVC2006 - II WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL*.
- Silva, J. A. (1994). *Aquisição e Processamento de Informação Tridimensional*. PhD thesis, Universidade do Porto.
- Sivic, J. e Zisserman, A. (2003). Video google: a text retrieval approach to object matching in videos. pages 1470–1477 vol.2.

- Trucco e Verri, A. (1998). *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall.
- True, N. (2007). Vacant parking space detection in static images.
- Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *Journal of Robotics and Automation*, RA-3(4):323–344.
- Wu, Qi. e Zhang, Y. (2006). Parking lots space detection. *School of Computer Science, Carnegie-Mellon University*.
- Zang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *IEEE*.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)