DANILO HABERMANN

**DETECÇÃO E RASTREAMENTO DE OBSTÁCULOS COM USO DE
SENSOR LASER DE VARREDURA**

**São Paulo
2010**

DANILO HABERMANN

DETECÇÃO E RASTREAMENTO DE OBSTÁCULOS COM USO DE
SENSOR LASER DE VARREDURA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Elétrica

São Paulo
2010

DANILO HABERMANN

DETECÇÃO E RASTREAMENTO DE OBSTÁCULOS COM USO DE
SENSOR LASER DE VARREDURA

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Elétrica

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas

Professor orientador: Claudio Garcia

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de agosto de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Habermann, Danilo

Detecção e rastreamento de obstáculos com uso de sensor laser de varredura / D. Habermann. – ed.rev. São Paulo, 2010. 59 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1. Sensor 2. Laser I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço

A Deus pela salvação eterna em Cristo Jesus e por tudo que tem me dado nesse mundo.

Aos meus pais, que tanto me apoiaram ao longo de minha vida.

Ao professor Claudio Garcia, meu orientador, pela amizade, pela confiança que depositou em mim e pelos sábios e prestimosos conselhos.

Ao Tenente-Coronel Paulo Roberto Costa e ao Coronel Robson Santana de Carvalho, antigo e atual Diretor do Arsenal de Guerra de São Paulo (AGSP), respectivamente, pelo prestimoso apoio.

Aos militares da Seção de Conservação, Recuperação e Instalação de Máquinas do AGSP e ao aluno Bruno Bichiati Mengatto pelo apoio na execução dos testes práticos.

Ao professor Douglas Eduardo Zampieri e aos integrantes do Laboratório de Mobilidade Terrestre da UNICAMP pelo apoio e pela disponibilização de equipamentos utilizados neste trabalho.

Por último, porém, não menos importante, aos meus amados filho e esposa, Heitor e Patricia, pelo carinho, suporte, companhia e compreensão.

RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema de rastreamento de obstáculos, utilizando sensor laser 2D e filtro de Kalman. Este filtro não é muito eficiente em situações em que ocorrem severas perturbações na posição medida do obstáculo, como, por exemplo, um objeto rastreado passando por trás de uma barreira, interrompendo o feixe de laser por alguns instantes, tornando impossível receber do sensor as informações sobre sua posição. Este trabalho sugere um método de minimizar esse problema com o uso de um algoritmo denominado Corretor de Discrepâncias.

ABSTRACT

An obstacle detection and tracking system using a 2D laser sensor and the Kalman filter is presented. This filter is not very efficient in case of severe disturbances in the measured position of the obstacle, as for instance, when an object being tracked is behind a barrier, thus interrupting the laser beam, making it impossible to receive the sensor information about its position. This work suggests a method to minimize this problem by using an algorithm called Corrector of Discrepancies.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Viatura Urutu com a proteção balística para o motorista e a proteção balística para o atirador.....	3
2.1	Principais causas de acidentes de trânsito.....	6
2.2	Sentido do fluxo dos veículos.....	7
2.3	Tipos de manobra.....	7
2.4	Evolução dos principais sistemas de um veículo inteligente.....	11
2.5	Exemplo de aplicação do <i>Adaptive Cruise Control</i>	11
2.6	Principais sistemas de um veículo autônomo.....	15
2.7	Estimação da Posterior pelo uso do Filtro de Kalman.....	19
3.1	Sensores utilizados pela equipe <i>Spirit of Berlin</i>	20
3.2	Representação da varredura vertical do sensor LUX IBEO.....	21
3.3	Representação do alcance dos sensores utilizados pela equipe de Princeton.....	23
3.4	Sensores usados pela equipe vencedora do DARPA <i>Urban Challenge</i>	23
3.5	Representação da varredura de 180° do laser Sick LMS-291.....	25
3.6	Refletividade de alguns tipos de materiais e alcance do sensor versus refletividade.....	26
4.1	Principais módulos de um sistema de detecção de obstáculos com uso de laser.....	27
4.2	Disposição dos obstáculos (O1,O2 e O3) distantes a uma distância r (5 ou 10 m) do sensor laser.....	28
4.3	Histograma dos dados padronizados para uma distância de 5 m e ângulo de 45°.....	29
4.4	Histograma dos dados padronizados para uma distância de 5 m e ângulo de 90°.....	29
4.5	Histograma dos dados padronizados para uma distância de 5 m e ângulo de 135°.....	30
4.6	Histograma dos dados padronizados para uma distância de 10 m e ângulo de 45°.....	30
4.7	Histograma dos dados padronizados para uma distância de 10 m e ângulo de 90°.....	31

4.8	Histograma dos dados padronizados para uma distância de 10 m e ângulo de 135°.....	31
4.9	Veículo acoplado com dois sensores laser.....	32
4.10	Resultados obtidos com e sem o uso do Filtro de Kalman.....	33
4.11	Visão geral do sistema de detecção e rastreamento de obstáculos.....	35
4.12	Representação de 3 grupos ou obstáculos para um determinado valor de D	36
4.13	Representação de 2 grupos ou obstáculos para um determinado valor de D	36
4.14	Detecção de obstáculos estáticos com uso de sensor laser: para $D=10$ cm são encontrados 31 grupos ou obstáculos.....	38
4.15	Detecção de obstáculos estáticos com uso de sensor laser: para $D=40$ cm são encontrados 6 grupos ou obstáculos.....	38
4.16	Dois veículos se aproximando do sensor laser.....	39
4.17	Veículo passando por trás de uma barreira.....	41
4.18	Histograma dos dados padronizados coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 15 m de distância e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.....	43
4.19	Histograma do ruído do sensor laser LMS-291 para um objeto a 15 m de distância.....	43
5.1	Um veículo se aproximando do sensor a 20 km/h.....	46
5.2	Um veículo se aproximando do sensor a 20 km/h (gráfico).....	46
5.3	Medições feitas pelo sensor laser de um mesmo veículo. (a) apenas 3 pontos são obtidos pelo laser a cerca de 41,5 m de distância e (b) diversos pontos coletados a uma distância de cerca de 1,5 m, o contorno da frente e do lado esquerdo do veículo.....	47
5.4	Comparação do deslocamento real do veículo (+) com a equação $S=40-5,55t$	48
5.5	Representação da configuração do teste com um veículo em movimento e o outro parado.....	48
5.6	Comparação do deslocamento estimado do veículo (+) com a equação $S=-32,5+5,55t$	49
5.7	Posição do veículo a cada varredura (a) só com filtro de Kalman e (b) com Corretor de Discrepâncias e filtro de Kalman.....	50

5.8	Veículo se aproximando do sensor e realizando uma conversão em U.....	51
5.9	Veículo se aproximando do sensor e realizando uma conversão em U, sendo $\varepsilon=0,00009$ e $\delta=0,00003$	51
5.10	Veículo se aproximando do sensor e realizando uma conversão em U. (a) sendo $\varepsilon=0,15\delta$ e (b) com $\varepsilon=60\delta$	52
5.11	O sensor laser consegue detectar todos os pontos na frente do veículo	53
5.12	Como a distância entre os pontos coletados d é menor que D , então entende-se que se trata apenas de um obstáculo.....	53
5.13	Posições do veículo registradas pelo sistema quando o mesmo aproximava-se do sensor com velocidade de até 70 km/h com $\varepsilon=0,03$ e $\delta=0,01$	54
5.14	Velocidades do veículo registradas pelo sistema quando o mesmo aproximava-se do sensor com velocidade de até 70 km/h. Os losangos são as velocidades medidas sem o uso do filtro e do corretor, os pontos são as velocidades estimadas com auxílio do filtro de Kalman e do Corretor de Discrepâncias.....	55

LISTA DE TABELAS

2.1	Principais funcionalidades de um veículo autônomo.....	14
3.1	Características das câmeras utilizadas no veículo autônomo.....	22
3.2	Características dos sensores utilizados no veículo autônomo que venceu a última competição DARPA <i>Urban Challenge</i>	24
4.1	Parâmetros obtidos da medição a 15 m do sensor.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS: *Anti-lock Braking System*

ACC: *Adaptive Cruise Control*

DARPA: *Defense Advanced Research Projects Agency*

DENATRAN: Departamento Nacional de Trânsito

GPS: Sistema de Posicionamento Global

IHM: Interface Homem-Máquina

IMU: *Inertial Measurement Unit*

LIDAR: *Light Detection and Ranging*

MDF: *Mission Data File*

IRU: *International Road Transport Union*

PBA: Proteção Balística do Atirador

PBM: Proteção Balística do Motorista

PROMETHEUS: *PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*

SAC: Sistema de Assistência ao Condutor

UKF: Filtro de Kalman *Unscented*

LIDAR: *Light Detection and Ranging*

USB: *Universal Serial Bus*

CONVENÇÕES E LISTA DE SÍMBOLOS

Na notação das fórmulas, as seguintes convenções foram utilizadas

- A^T é a matriz transposta de A ;
- Os elementos que compõem uma matriz são exibidos da seguinte forma $\begin{bmatrix} x1 & x2 \\ x3 & x4 \end{bmatrix}$, sendo $x1$, $x2$, $x3$ e $x4$ os elementos da matriz;

Os seguintes símbolos são utilizados:

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>
t	Tempo contínuo
k	Tempo discreto ou número de varreduras
x,y	Parâmetros que indicam a posição (x,y)
$bel(x_t)$	Belief ou crença
$p(x)$	Probabilidade de x
μ	Média de distribuição gaussiana
Σ	Matriz covariância de distribuição gaussiana
u_t	Ação de controle
ε_t	Ruído branco sobre as equações de estado de tempo contínuo que modelam o movimento do veículo
δ_t	Ruído branco oriundo da medição
A_t	Matriz da equação de estados que descreve como o estado evolui de t para $t+1$
B_t	Matriz que descreve como a ação de controle u_t modifica o estado de t para $t+1$
z_t	Vetor que armazena os valores medidos pelo sensor
C_t	Matriz que relaciona os estados com o vetor z_t
R_t	Covariância do vetor ε_t
Q_t	Covariância do vetor δ_t
K	Ganho de Kalman
σ	Desvio padrão

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>
H	Matriz que relaciona os estados com o vetor de medição (XIANG)
$(\Delta x, \Delta y)$	Diferença da posição central do obstáculo durante duas amostras consecutivas (XIANG)
(e_x, e_y)	Erros de posição (XIANG)
xm_i	ponto médio do obstáculo i-ésimo obstáculo no eixo x
ym_i	ponto médio do obstáculo i-ésimo obstáculo no eixo y
X	Matriz que armazena os valores de medição obtidos pelo sensor laser no eixo x
Y	Matriz que armazena os valores de medição obtidos pelo sensor laser no eixo y
G_i	Grupo que armazena os pontos pertencentes ao mesmo obstáculo
D	Distância entre pontos que define se um ponto pertence ao mesmo grupo ou não
xm_{ik}	Ponto médio do i-ésimo obstáculo no eixo x em uma k-ésima varredura
ym_{ik}	Ponto médio do i-ésimo obstáculo no eixo y em uma k-ésima varredura
P_k	Vetor que armazena os pontos médios dos i obstáculos encontrados na k -ésima varredura
p_{ik}	Elemento do vetor P_k
$Vaux$	Vetor auxiliar utilizado na rotina de confirmação do ponto médio
$\dot{x}m_{ik}$	Velocidade no eixo x do ponto médio do i-ésimo obstáculo da k-ésima varredura
$\dot{y}m_{ik}$	Velocidade no eixo y do ponto médio do i-ésimo obstáculo da k-ésima varredura
m_i	Média das distâncias entre as últimas cinco posições do veículo
$\dot{x}m'_{ik}, \dot{y}m'_{ik}$	Velocidades nos eixos x e y após a aplicação do filtro de Kalman (velocidade estimada)
Vxm_i, Vym_i	Médias das dez últimas velocidades dos obstáculos nos eixos x e y
xm'_{ik}	Valor estimado ponto médio do i-ésimo obstáculo no eixo x em uma k-ésima varredura
ym'_{ik}	Valor estimado ponto médio do i-ésimo obstáculo no eixo y em uma k-ésima varredura

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	ACIDENTES DE TRÂNSITO	5
2.2	ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE A TAREFA DE DIRIGIR UM VEÍCULO	8
2.2.1	<i>JULGAMENTO SOBRE A VELOCIDADE RELATIVA.....</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>TEMPO DE REAÇÃO.....</i>	<i>8</i>
2.3	VEÍCULOS AUTÔNOMOS	9
2.3.1	<i>BREVE HISTÓRICO</i>	<i>10</i>
2.3.2	<i>PRINCIPAIS FUNCIONALIDADES DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO</i>	<i>13</i>
2.3.3	<i>PRINCIPAIS SISTEMAS DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO.....</i>	<i>14</i>
2.4	FILTRO DE KALMAN.....	16
3	SENSORES UTILIZADOS EM VEÍCULOS AUTÔNOMOS.....	20
4	DETECÇÃO E RASTREAMENTO DE OBSTÁCULOS COM USO DE SENSOR LASER	26
4.1	TESTES REALIZADOS COM O SENSOR LASER	27
4.2	TRABALHOS SOBRE RASTREAMENTO DE OBSTÁCULOS COM SENSOR LASER EMPREGANDO FILTRO DE KALMAN.....	31
4.3	PROPOSTA DE RASTREAMENTO UTILIZANDO FILTRO DE KALMAN.....	33
4.3.1	<i>AGRUPAMENTO DE PONTOS E DETERMINAÇÃO DO PONTO MÉDIO DE CADA OBSTÁCULO</i>	<i>34</i>
4.3.2	<i>CONFIRMAÇÃO DO PONTO MÉDIO.....</i>	<i>38</i>
4.3.3	<i>MEDIÇÃO DA VELOCIDADE.....</i>	<i>39</i>
4.3.4	<i>RASTREAMENTO DOS OBSTÁCULOS</i>	<i>39</i>
5	RESULTADOS OBTIDOS	44
5.1	TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE CONSTANTE DE 20 KM/H LINHA RETA.....	
5.2	TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE DE 20 KM/H ULTRAPASSANDO UM VEÍCULO PARADO.....	47

5.3	TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE INICIAL DE 40 KM/H APROXIMANDO-SE DO SENSOR E FAZENDO UMA CONVERSÃO EM “U”.....	49
5.4	TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE DE ATÉ 70 KM/H.....	51
6	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O trânsito de veículos tem sido um dos grandes problemas da sociedade moderna. As grandes cidades do mundo têm sido cada vez mais reféns dos gigantescos engarrafamentos e dos inúmeros acidentes ocorridos.

Muitas horas têm sido gastas no trânsito, diminuindo o tempo para as pessoas se dedicarem a outras tarefas, seja de trabalho ou de lazer. De acordo com o Portal Terra (2009), na capital do Estado de São Paulo, o tempo médio que o cidadão perde nos deslocamentos diários é de duas horas.

Os acidentes de trânsito são uma das principais causas de morte no mundo. Muitos dispositivos já foram desenvolvidos e trabalhos estão sendo realizados para tentar diminuir esses números. Pode-se citar o exemplo do *airbag* e do freio ABS e de estudos sobre sistemas que conseguem verificar e gerar um alarme quando o motorista adormece.

Frações de segundo podem ser decisivas para se evitar acidentes de trânsito. Pesquisas indicam que cerca de 60% das colisões traseiras e quase um terço das colisões frontais poderiam ser evitadas, caso o condutor reagisse apenas meio segundo antes (MIRANDA NETO; ZAMPIERI, 2008). Por esse fato justificam-se os estudos sobre sistemas que possam informar com antecedência alguns riscos de colisões com outros veículos ou auxiliar o motorista em mudança de faixa na pista.

Veículos autônomos poderiam trazer grandes benefícios à sociedade, quer seja na diminuição de acidentes ou dispensando o ser humano de tarefas de transporte de cargas.

O sistema deve ser capaz de compreender o ambiente. Há necessidade de se identificar as pistas, as placas de trânsito e detectar e rastrear a aproximação de obstáculos estáticos ou dinâmicos. Essa diversificação de tarefas é impossível de ser obtida por um único sensor. É preciso conciliar o uso de vários sensores.

No geral, câmeras de vídeo são ideais para identificar sinais de trânsito e as faixas da pista. No entanto, possuem dificuldade em estimar com precisão as distâncias dos diversos objetos que se apresentam na imagem. Essa carência pode ser dirimida com uso de sensores laser, que possuem uma precisão muito grande em medições de distância e podem ser empregados independentemente de condições de luminosidade.

1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos objetivos deste trabalho é detectar obstáculos com o uso de um sensor laser. Essa funcionalidade pode ser aplicada em veículos autônomos, bem como em sistemas que possam auxiliar o motorista (vide Capítulo 2), garantindo maior segurança durante o trajeto do veículo.

Esses sistemas podem diminuir a quantidade de acidentes de trânsito, já que muitos deles são causados por falhas humanas. Além disso, esses veículos podem aliviar o estresse de motoristas em dias de grandes congestionamentos, pois eles poderão assistir a um filme, ler um livro ou falar tranquilamente ao celular enquanto o seu veículo os leva para seu destino.

Em aplicações militares, esses veículos podem ter uma grande utilidade. O teatro de operações dos conflitos bélicos mudou radicalmente nas últimas décadas. Hoje, há muitas operações desenvolvidas dentro da área urbana, onde há uma grande presença de civis. No Haiti, país em que o Brasil comanda a Força de Paz da ONU, o emprego da viatura Urutu tem sido intenso. Basicamente, todas as missões de deslocamentos de pessoal têm ocorrido com o apoio desta viatura blindada. Seu projeto original previa a utilização de escotilhas nas áreas de conflito. No entanto, esta peça dificulta muito a tarefa de dirigir, pois o motorista fica com um campo de visão reduzido. Isso colocava em risco a vida de civis nas estreitas ruas das favelas de Porto Príncipe. Uma rápida solução desenvolvida pelo Arsenal de Guerra de São Paulo, unidade do Exército Brasileiro responsável pela manutenção e fabricação de material de emprego militar, foi o desenvolvimento de uma proteção balística para o motorista (PBM) e uma proteção balística para o atirador (PBA), conforme ilustra a Figura 1.

Em um primeiro momento, a PBA e a PBM trouxeram um benefício muito grande às operações, protegendo os militares de fogos dos revoltosos e aumentando o campo de visão do motorista. Entretanto, essas proteções acresceram consideravelmente o peso do veículo, trazendo desgaste prematuro nas engrenagens da torre de tiro e no sistema de suspensão, onerando dessa forma a manutenção. Isso poderia ser evitado se a viatura fosse autônoma ou contasse com algum subproduto de uma tecnologia autônoma, como é o exemplo de um sistema de assistência ao condutor (SAC).

Figura 1.1: Viatura Urutu com a proteção balística para o motorista e a proteção balística para o atirador.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- ✓ identificar as principais funcionalidades de um veículo autônomo;
- ✓ identificar os principais sensores utilizados em veículos autônomos e semi-autônomos;
- ✓ identificar as principais características na detecção de obstáculos com uso de sensor laser; e
- ✓ detectar e rastrear veículos utilizando sensor laser.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta informações a respeito de acidentes de trânsito, veículos autônomos e filtro de Kalman. Os principais sensores, suas características e emprego podem ser observados no Capítulo 3. Já o Capítulo 4 aborda a configuração do sistema proposto para realizar a detecção e rastreamento de obstáculos utilizando sensor laser, bem como alguns resultados práticos. O Capítulo

5 apresenta os resultados obtidos e o Capítulo 6 traz as conclusões e sugestões para os próximos passos a serem dados no sentido de se aprimorar um sistema de detecção de obstáculos com uso de sensor laser.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta uma rápida revisão em tópicos importantes, a fim de entender quais são os requisitos técnicos e operacionais necessários para o desenvolvimento de um sistema de detecção de obstáculos com uso de sensor laser.

2.1 ACIDENTES DE TRÂNSITO

Com a finalidade de projetar sistemas capazes de diminuir acidentes, o entendimento sobre os principais tipos de colisões e as suas causas é fundamental. O conhecimento sobre as cifras despendidas na reabilitação da saúde e em benefícios da seguridade social justifica investimentos em tecnologias que possam diminuir o número de colisões no trânsito, poupando, além de muitas vidas, muitos recursos do governo, que poderão ser alocados em outras áreas.

As causas dos acidentes estão ligadas às falhas mecânicas, às condições ambientais e às falhas humanas. Estas são ocasionadas por falhas na formação do condutor, por desatenção, por cansaço ou sono, por uso de drogas ou por total negligência e desrespeito às normas de trânsito.

No ano de 2006 no Brasil, morreram dezenove mil setecentos e cinquenta e duas (19.752) pessoas e outras quatrocentos e quatro mil trezentos e oitenta e cinco (404.385) ficaram feridas, vítimas de acidente de trânsito, de acordo com os dados do DENATRAN. Ou seja, para cada morte, existe cerca de 20 feridos. Devido ao fato de muitos atestados de óbito não fazerem referência à *causa mortis*, mas somente às lesões, muitas mortes causadas por acidentes de trânsito não são catalogadas. Na China, os números são ainda mais alarmantes. No período de 2000 a 2005, quinhentas mil (500.000) pessoas perderam suas vidas e mais dois milhões e seiscentas mil (2.600.000) ficaram feridas em acidentes envolvendo veículos (CHENG et al, 2007).

As lesões decorrentes dos acidentes de trânsito trazem graves prejuízos ao indivíduo: financeiros, familiares, sociais, psicológicos e profissionais. Para a sociedade, os prejuízos são gastos hospitalares, diminuição da capacidade produtiva, custos previdenciários, entre outros.

O custo econômico desses acidentes é estimado em 74 bilhões de dólares por ano nos EUA. Uma estimativa modesta ultrapassaria 10 bilhões de dólares no caso do Brasil (ROXO; BOIS, 2006).

De acordo com Evans (1991), 2% dos acidentes de trânsito observados em uma pesquisa realizada no Reino Unido foram causados exclusivamente pelas condições ambientais da rodovia, 2% estão ligados somente com as falhas do veículo e 65% são exclusivos de falhas humanas. Além disso, constatou-se que 95% dos acidentes têm o fator falha humana como causa, quer como fato isolado, quer associado a outros fatores.

A falta de atenção foi apontada como causa de 76,6% dos acidentes com veículos pesados na rodovia BR-153 em um estudo epidemiológico sobre acidentes de trânsitos (SANTOS, 1999 apud MELIONE, 2006).

Um estudo realizado pelo *International Road Transport Union* (IRU), intitulado *European Truck Accident Causation*, em que foram analisados 624 acidentes na Europa, com pelo menos uma vítima, envolvendo caminhões, revelou que 85,2% deles foram causados por falhas humanas. No entanto, 75% desses acidentes foram causados não por falhas dos caminhoneiros e sim dos demais usuários de veículos e pedestres. A Figura 2.1 mostra os demais fatores causadores dos acidentes.

Outra informação relevante apontada nesse estudo revela que 27% dos acidentes ocorreram tipicamente nas operações de cruzamento de interseções, 20,6% em congestionamentos (filas, colisões na traseira), 19,5% em mudanças de faixas e 11,3% em manobras de acesso. A análise sobre os erros humanos quando o caminhão provocou o acidente mostrou que falhas na observação das regras de interseções, velocidade inadequada e manobra imprópria nas mudanças de faixas foram as causas principais dos eventos.

Figura 2.1: Principais causas de acidentes de trânsito (IRU, 2007)

Conforme o estudo da IRU, as principais causas de colisões em congestionamentos e mudanças de faixas são as seguintes:

Principais causas das colisões em congestionamentos (Figura 2.2):

- ✓ Velocidade não compatível com a via: 22,1%
- ✓ Distância de segurança inadequada: 16,2%
- ✓ Falta de atenção: 12,8%
- ✓ Cansaço/sono: 2,3%

Figura 2.2: Sentido do fluxo dos veículos (IRU, 2007)

Principais causas das colisões em mudanças de faixa (Figura 2.3):

- ✓ Manobra imprópria: 15,7%
- ✓ Cansaço/sono: 8,8%
- ✓ Velocidade imprópria: 6,7%
- ✓ Distância de segurança inadequada: 4,4%

Figura 2.3: Tipos de manobra (IRU, 2007)

Outra informação relevante é que, de acordo com o Anuário Estatístico do DENATRAN - RENAEST 2006, dos 19.752 mortos em acidentes de trânsito no Brasil, 4.404 eram condutores, 4.214 eram passageiros, 4.375 eram pedestres, 3.186 eram motociclistas, 1.214 eram ciclistas e 2.359 casos não foram informados. Esses dados mostram que um veículo autônomo deve ter capacidade de detectar e

rastrear pedestres, ciclistas e motociclistas, pois juntos representam 44,3% das vítimas fatais no Brasil em 2006.

Os veículos autônomos devem ter especial atenção a objetos em movimento e, particularmente, a pessoas. Essas se movem em locais imprevisíveis. Mesmo que o sistema detecte a presença de um ser humano, isso não garante que ele não entrará no caminho do veículo. É necessário conseguir distinguir os objetos das pessoas, então, deve-se continuamente monitorar seu movimento e prever suas futuras ações (AUFRÈRE, 2003).

2.2 ASPECTOS IMPORTANTES SOBRE A TAREFA DE DIRIGIR UM VEÍCULO

Para dirigir um veículo é fundamental que o motorista tenha controle simultâneo das posições longitudinais e laterais, condições ambientais, painel do veículo e sinais de trânsito, fazendo uso do volante, acelerador e freios. Além disso, são necessárias habilidades cognitivas de alto nível, como estimativa de situações futuras, partindo-se de informações presentes.

A visão constitui 90% das informações de entrada na tarefa de dirigir. No entanto, quando o ambiente está bem visível, os sinais de trânsito são pouco observados pelo motorista devido à grande sensação de segurança que um dia limpo proporciona (EVANS, 1991).

2.2.1 JULGAMENTO SOBRE A VELOCIDADE RELATIVA

Para distâncias entre 100 a 200 metros de um veículo ao outro, quando ambos vão no mesmo sentido e têm a mesma velocidade, 75% das pessoas têm a sensação de que os veículos estão se aproximando. Já para uma distância de 60 metros, com um carro se aproximando do outro com uma velocidade relativa de 5 km/h, para 99% das pessoas isso é perceptível (EVANS, 1991).

2.2.2 TEMPO DE REAÇÃO

O tempo de reação humana pode ser entendido como o tempo necessário para que uma pessoa perceba e reaja a algum estímulo externo. Isto é muito importante para o sucesso em atividades que exijam respostas rápidas.

O tempo de reação ou reflexo do indivíduo tem início com uma mensagem enviada ao cérebro e termina quando o corpo executa uma resposta ou reação física. Por exemplo, quando o motorista avista um obstáculo (a mensagem), isso é registrado no cérebro e resulta em uma reação ao perigo: em uma freiada, desvio do obstáculo ou outra manobra apropriada. Para que o cérebro receba a mensagem e diga ao corpo para executar uma ação leva tempo, ou seja, o tempo de reação.

As duas características mais importantes do tempo de reação são o número de estímulos de possíveis ameaças e o número de respostas e a expectativa da ameaça (EVANS, 1991). Se uma pessoa recebe uma instrução de tocar um único botão toda vez que for acesa uma única lâmpada e, estando essa atenta para o acendimento da lâmpada, o seu tempo de reação é cerca de 0,15 segundos. Quando o número de estímulos (lâmpadas) e respostas (botões) aumenta, o tempo de reação também aumenta.

O tempo de reação no trânsito depende de identificar uma variedade de eventos em um ambiente complexo. Geralmente, o motorista não está a todo tempo esperando uma ameaça, por isso o tempo de reação aumenta. É indicado considerar um tempo de reação mínimo de 2,5 segundos para que o motorista tenha condições de tomar a atitude correta, a fim de evitar a colisão (EVANS, 1991).

2.3 VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Veículo autônomo é aquele que pode se locomover de um ponto a outro em qualquer tipo de terreno sem auxílio de motorista ou de controle remoto. Os principais sistemas desse veículo são o Sensoriamento, Percepção, Planejamento e Controle, Interface com o Usuário e Interface com o Veículo.

Outra tecnologia que será citada nesse trabalho é a respeito de veículo semi-autônomo ou sistema de assistência ao condutor (SAC), cuja principal diferença para um sistema autônomo é que este necessita ter conhecimento do modelo cinemático e dinâmico do veículo, enquanto que para um SAC isso não é preciso. Todas as informações para a navegação são disponibilizadas em uma Interface Homem-Máquina (IHM). Desta forma, para um sistema autônomo o resultado da análise sensorial gera comandos de movimentos aos atuadores do veículo, enquanto que para um SAC são gerados alertas ao condutor, que por sua vez, interage com os atuadores do veículo (MIRANDA NETO & ZAMPIERI, 2008).

2.3.1 Breve histórico

Desde 1975, muitos estudos sobre esse assunto foram realizados. Contudo, os avanços ganharam força após a iniciativa europeia em investir nessa tecnologia, criando o Projeto PROMETHEUS (*EUREKA Prometheus Project: "PROgramme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety"*) e com as competições americanas realizados pelo *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA).

O Projeto PROMETHEUS ocorreu entre os anos de 1987 e 1995. Foram investidos mais de 800 milhões de euros em tecnologias ligadas a veículos autônomos. Um dos auge deste projeto foi alcançado em 1995, quando um veículo projetado por Ernst Dickmanns fez o percurso de ida e volta de Munique a Copenhague, alcançando uma velocidade máxima de 175 km/h. O veículo foi capaz de realizar ultrapassagens sem auxílio humano e conseguiu percorrer um trecho de 158 km sem qualquer intervenção humana. No entanto, o sistema não era completamente eficiente, pois foram necessárias, em alguns casos, ações do motorista no sentido de evitar colisões.

A agência americana DARPA, desde 2002 estimula universidades, colégios e empresas, de dentro e fora dos *EUA*, a desenvolverem veículos autônomos. Um dos objetivos do governo americano é transformar um terço de sua frota de veículos militares em autônomos até 2015. Em 2007, ocorreu o desafio urbano organizado pelo DARPA (*Urban Challenge*), em que participaram 86 equipes oriundas de oito países. Esse evento tem congregado as principais equipes de pesquisa sobre veículos autônomos em todo o mundo.

Muitos sistemas foram desenvolvidos com o intuito de gerar mais conforto e segurança ao motorista. Esses foram sendo utilizados de forma direta ou indireta para o desenvolvimento de veículos autônomos. A Figura 2.4 apresenta uma evolução dos principais sistemas ao longo do tempo, entre os quais se destacam os seguintes:

Figura 2.4: Evolução dos principais sistemas de um veículo inteligente (Rojas,2005)

- ✓ **ADAPTIVE CRUISE CONTROL (ACC):** é um sistema capaz de medir a velocidade de obstáculos que se encontram à frente do veículo e de estimar qual deve ser a distância mínima de segurança entre os dois. Quando essa distância é desrespeitada, gera-se um alarme visual ou sonoro para alertar o motorista. O sensor utilizado para essa funcionalidade é o radar, que possui um alcance de até 200 metros (Figura 2.5). Uma das deficiências do ACC é a incapacidade de detectar obstáculos que não estejam na mesma direção do veículo, como é caso de obstáculos que se encontrem após uma curva.

Figura 2.5: Exemplo de aplicação do ACC: o veículo à esquerda é equipado com sensor radar e pode detectar a velocidade do veículo à frente e informar ao motorista qual deve ser a distância mínima de segurança (Extraído do 5th Meeting of the U.S. Software System Safety Working Group)

- ✓ **LANE DEPARTURE WARNING:** tem por objetivo alertar o motorista toda vez que o veículo sair de sua faixa na pista. Em geral, o sensor utilizado para essa funcionalidade é a câmera de vídeo.

- ✓ **STOP AND GO:** com o intuito de diminuir o estresse do motorista devido às constantes ações de acelerar e frear para se manter a uma distância segura do veículo da frente e de diminuir acidentes, foi desenvolvida uma tecnologia capaz de deixar o veículo a uma distância segura dos veículos à frente ou em uma velocidade constante pré-definida na ausência de obstáculos à frente. A aceleração e a frenagem são realizadas automaticamente. Um exemplo dessa aplicação foi desenvolvida pela empresa Siemens, que desenvolveu um sistema *stop and go*, empregando sensores laser, radar e câmera de vídeo, e sendo capaz de operar quando o veículo se locomove de zero a 50 km/h.
- ✓ **LANE CHANGE ASSISTANCE:** é um sistema capaz de controlar automaticamente o veículo em mudanças de faixas adjacentes da pista. O motorista aciona o comando para fazer a mudança de faixa, então, o sistema verifica os obstáculos à frente e nas laterais, estima a velocidade adequada e executa a mudança de faixa (BRAEUCHLE & BOECKER, 2007). O sensor mais empregado para esta função é a câmera de vídeo.
- ✓ **COLLISION WARNIG:** este sistema é capaz de detectar os obstáculos nos arredores do veículo, calcular a velocidade relativa e a direção na qual os mesmos se aproximam e gerar um alarme ao motorista sobre os obstáculos que se aproximam de forma a colidir com o veículo. Os sensores utilizados nesta aplicação são a câmera de vídeo e o sensor laser (MERTZ et al, 2005).
- ✓ **COLLISION AVOIDANCE:** este sistema é bem similar ao *Collision Warning*, porém, neste caso o veículo é equipado com atuadores para realizar automaticamente a frenagem e as mudanças rápidas de direção com o intuito de desviar do obstáculo que se move na direção do veículo (TAKAHASHI et al, 2009).

2.3.2 Principais funcionalidades de um veículo autônomo

Em 2006, a agência americana DARPA publicou um documento intitulado Critérios de Avaliação Técnica (*Urban Challenge Technical Evaluation Criteria*), divulgando como seriam feitas as avaliações das equipes que participariam do desafio urbano em 2007. Os critérios foram divididos em quatro grandes grupos:

a) Navegação Básica:

- ✓ O veículo autônomo deve estar pronto para cumprir as missões no máximo em 5 minutos após ter recebido o arquivo com os dados da missão (MDF: *Mission Data File*);
- ✓ Os veículos devem seguir os *checkpoints* estabelecidos no MDF;
- ✓ O veículo deve sempre se manter dentro da pista, mesmo quando for desviar de obstáculos;
- ✓ O veículo deve se manter dentro dos limites mínimos e máximos de velocidade estabelecidos;
- ✓ O veículo deve agir de forma sempre a evitar colisões;
- ✓ O veículo deve manter distância de segurança (de uma a quatro vezes o comprimento do veículo) ao realizar as ultrapassagens;
- ✓ O veículo deve ser capaz de realizar conversões tipo U.

b) Tráfego Básico:

- ✓ Os veículos devem obedecer a ordem de chegada em cruzamentos, ou seja, o primeiro veículo a parar, deve ser o primeiro a sair;
- ✓ Ao parar em uma fila, o veículo deve manter uma distância do veículo à frente (de uma a duas vezes o comprimento do veículo).

c) Navegação Avançada:

- ✓ O veículo deve ser capaz de entrar e sair de uma vaga de estacionamento delimitada por faixas no chão;
- ✓ O veículo deve ter a capacidade de identificar outra rota quando verificar que uma determinada estrada esteja bloqueada;
- ✓ O veículo deve ser capaz de navegar de forma segura por um certo período sem o sinal de GPS.

d) **Tráfego Avançado:**

- ✓ O veículo deve estimar as possíveis colisões e realizar manobras defensivas a fim de evitá-las.

Todos os participantes se basearam nesse documento para desenvolver os seus projetos. Ficaram fora do escopo desse desafio o cruzamento sobre linhas de trens, a detecção de pedestres e bicicletas e a identificação de sinais de trânsito que empregam luzes. A equipe da Universidade de Princeton, que participou do DARPA *Urban Challenge* de 2007, entendeu que o veículo deveria ser capaz de identificar as seguintes funcionalidades, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Principais funcionalidades de um veículo autônomo

(Adaptado de ATREYA et al, 2007)

Categorias	Funcionalidades	Nr
Sinalizações na Pista	Detecção de sinais de PARE pintados na pista	1
	Detecção das faixas laterais da pista	2
	Detecção de guias ou contornos sobressalentes na pista na ausência das faixas	3
Obstáculos	Detectar se há barreiras na pista	4
	Detecção de outros obstáculos de tamanho significativo que possam aparecer no caminho do veículo	5
Veículos	Detecção das distâncias dos veículos à frente	6
	Detecção das distâncias dos veículos que estejam nas faixas laterais	7
	Detecção de obstáculos e veículos que se encontrem atrás do veículo autônomo	8
Tráfego	Detecção de veículos que se aproximem no sentido contrário ao deslocamento do veículo autônomo	9
	Detecção de todos os veículos que se aproximem em uma intersecção de vias	10
	Detecção de cruzamentos a uma distância adequada para garantir a segurança	11

2.3.3 Principais sistemas de um veículo autônomo

Conforme observado na Tabela 2.1, um veículo autônomo deve ser capaz de realizar muitas tarefas. A construção de um veículo dessa natureza requer o domínio de diversas disciplinas do conhecimento, como visão computacional, mapeamento

digital com uso de sensores laser, localização global com ou sem uso de um sistema de posicionamento global (GPS).

O robô denominado Stanley, desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Stanford, da Volkswagen (EUA), da Intel Research e da Mohr Davidow Ventures, foi o vencedor do DARPA *Grand Challenge* em 2005, realizado no deserto de Mojave nos Estados Unidos. Os principais sistemas deste veículo podem ser observados na figura 2.6.

Figura 2.6: Principais sistemas de um veículo autônomo (adaptado de THRUN et al, 2006)

O sistema de Sensoriamento possui diversos módulos de software responsáveis por receber os dados oriundos dos diversos sensores: laser, câmeras de vídeo, radar, GPS e *inertial measurement unit* (IMU).

A criação de um mapa com duas dimensões baseado nos dados enviados pelos sensores laser, radar e câmera é de responsabilidade do sistema de Percepção. O filtro de Kalman *Unscented* (UKF) estima a velocidade, a orientação e as coordenadas do veículo. Este sistema ainda detecta os limites da estrada e outros parâmetros, a fim de determinar uma velocidade de segurança para o veículo.

O sistema de Planejamento e Controle se encarrega de gerar sinais para o controle de direção, aceleração e frenagem. Uma das principais funções, contudo, desse sistema é identificar e atualizar a trajetória a ser realizada pelo veículo.

Por critério de segurança, caso seja necessário que o veículo pare imediatamente, o usuário pode apertar um botão de parada de emergência (*E-stop*). Através de uma interface *touch-screen* é possível inicializar o software do veículo

autônomo. Essas duas funcionalidades são de responsabilidade do sistema de Interface com o Usuário.

O sistema de Interface com o Veículo contém todos os dispositivos mecânicos e eletrônicos para executar a frenagem, aceleração e o direcionamento das rodas. Ele, ainda, é responsável por fornecer a energia para todos os componentes do sistema.

O sistema de Serviços Globais fornece serviços básicos para todos os módulos de software dos outros sistemas, tais como sincronização e comunicação. Além disso, possui um servidor que armazena os dados de todos os parâmetros do veículo e os mantém atualizados.

Os esforços desse trabalho se concentram no detalhamento do sistema de Sensoriamento e no sistema de Percepção. Neste último, a preocupação será na detecção de obstáculos com uso de sensor laser. Os Capítulos 3 e 4 abordarão esses assuntos.

2.4 FILTRO DE KALMAN

O Filtro de Kalman é um algoritmo recursivo muito eficiente. Ele é utilizado para estimar as variáveis de estado de sistemas representados por equações de estado lineares. Considera-se que o sistema seja perturbado por ruído branco gaussiano, de forma que os estados possam ser tratados como variáveis aleatórias gaussianas.

Antes de tecer mais comentários sobre o Filtro de Kalman, é importante apresentar algumas considerações e definições.

O conhecimento interno do veículo sobre sua localização no ambiente é denominada *belief*, que é definido como:

$$\text{bel}(x_t) = p(x_t \mid z_{1:t}, u_{1:t}) \quad (2.1)$$

A *belief* é a probabilidade condicional do estado no instante t , dado que se conheçam todas as medições (z_t) e ações de controle (u_t) no instante t e nos instantes anteriores. A *belief* é calculada após a leitura dos dados de medição z_t . Em alguns casos, é interessante ter o conhecimento da posição do veículo antes de

incorporar a informação sobre a medição no tempo corrente do estado em questão. Dessa forma, tem-se que:

$$\overline{\text{bel}}(x_t) = p(x_t \setminus z_{1:t-1}, u_{1:t}) \quad (2.2)$$

Em geral a variável de estado x_t não apresenta um único elemento, mas vários, como por exemplo, posições x e y de um veículo no plano, velocidade e aceleração. Para o uso do Filtro de Kalman, considera-se que a função densidade de probabilidade de um vetor de estado seja uma distribuição normal ou gaussiana:

$$p(x) = \det(2\pi \Sigma)^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Sigma^{-1}(x - \mu)\right\} = N(x_t; \mu_t; \Sigma_t) \quad (2.3)$$

Uma probabilidade do tipo $p(x \setminus z)$ é chamada de posterior. Ela é gaussiana se satisfaz as condições de Markov para redes Bayesianas, ou seja, os dados passados e futuros são independentes quando se conhece o estado atual (Thrun, 2006). Além disso, é necessário assegurar as seguintes condições:

1. A probabilidade de transição de estado $p(x_t \setminus u_t, x_{t-1})$ deve ser uma função linear em seus argumentos e com ruído gaussiano.

$$x_t = A_t x_{t-1} + B_t u_t + \varepsilon_t \quad (2.4)$$

A equação (2.4) mostra como as variáveis de estado evoluem em função do estado anterior e da ação de controle. A matriz A_t possui dimensão $(n \times n)$ e descreve como o estado evolui de t para $t+1$, baseado apenas no estado anterior. A matriz B_t , de dimensão $(n \times m)$, descreve como a ação de controle u_t modifica o estado de t para $t+1$. Essas duas matrizes são determinísticas. Essa é a equação que será utilizada para modelar o estado no emprego do Filtro de Kalman.

2. A probabilidade da medição $p(z_t \setminus x_t)$ deve ser linear em seus argumentos e com ruído gaussiano.

$$z_t = C_t x_t + \delta_t \quad (2.5)$$

$$p(z_t / x_t) = \det(2\pi Q_t)^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(z_t - C_t x_t)^T Q_t^{-1}(z_t - C_t x_t)\right\} \quad (2.6)$$

Neste caso, C_t é uma matriz de dimensão $(k \times n)$, onde k é o tamanho do vetor da medição z_t . Os vetores aleatórios ε_t e δ_t representam o ruído do processo e da medição. Eles são considerados gaussianos, com média zero, independentes e com covariância R_t e Q_t , respectivamente.

3. Para finalizar, o valor inicial da *belief* deve ser normalmente distribuído.

$$\text{bel}(x_0) = \det(2\pi \Sigma_0)^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x_0 - \mu_0)^T \Sigma_0^{-1}(x_0 - \mu_0)\right\} \quad (2.7)$$

As três condições apresentadas acima são suficientes para garantir que a posterior *belief*, $\text{bel}(x_t)$, sempre será uma gaussiana.

O Filtro de Kalman expressa a *belief*, no tempo t , como uma gaussiana $N(x_t; \mu_t, \Sigma_t)$, isto é, uma distribuição normal com média μ_t e matriz covariância Σ_t . O algoritmo do Filtro de Kalman é apresentado a seguir:

Algoritmo do Filtro de Kalman $(\mu_{t-1}, \Sigma_{t-1}, u_t, z_t)$:

Predição:

$$\bar{\mu}_t = A_t \mu_{t-1} + B_t u_t$$

$$\bar{\Sigma}_t = A_t \Sigma_{t-1} A_t^T + R_t$$

Correção:

$$K_t = \bar{\Sigma}_t C_t^T (C_t \bar{\Sigma}_t C_t^T + Q_t)^{-1}$$

$$\mu_t = \bar{\mu}_t + K_t (z_t - C_t \bar{\mu}_t)$$

$$\Sigma_t = (I - K_t C_t) \bar{\Sigma}_t$$

Retorna μ_t, Σ_t

A entrada do Filtro de Kalman é bel_{t-1} , ou seja, a crença ou *belief* sobre a posição do veículo no estado anterior, representada por $\bar{\mu}_t$ e $\bar{\Sigma}_t$. Para atualizar esses parâmetros são consideradas a ação de controle u_t e a medição z_t . A variável K_t é chamada de ganho de Kalman. Ela determina a proporção em que a medição será considerada para estimar o novo vetor de estado $\text{bel}(x_t)$.

Inicialmente tem-se o conhecimento sobre $\text{bel}(x_{t-1})$, conforme mostrado na Fig. 2.7 (*prior*). É realizada a medição com auxílio dos sensores do robô e tem-se,

dessa forma, uma curva que representa em que local mais provável se encontra o veículo sob o ponto de vista da medição (*measurement*).

Aplicando-se o Filtro de Kalman estima-se o valor de $bel(x_t)$, considerando as informações anteriores de $bel(x_{t-1})$ e da medição realizada. A curva gaussiana ao centro na Figura 2.7 apresenta $bel(x_t)$ estimado.

Fig.2.7. Estimação da Posterior pelo uso do Filtro de Kalman (Stanford CS223B Computer Vision).

3 SENSORES UTILIZADOS EM VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Em virtude da grande versatilidade que deve possuir um veículo autônomo, é impossível conseguir utilizar um único sensor para detectar todas as variáveis do ambiente. Todos os projetos nessa área que foram analisados utilizam mais de um sensor.

A equipe *Spirit of Berlin* da *Frei Universität Berlin* também participou do *DARPA Urban Challenge* em 2007. Eles utilizaram um sensor laser instalado no para-choques dianteiro do carro a fim de detectar os obstáculos que se encontrem à frente do veículo. Sobre o teto do automóvel, encontram-se uma antena de um sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* – GPS), dois sensores laser fixados em uma base rotativa e uma câmera onidirecional (Figura 3.1).

Figura 3.1: Sensores utilizados pela equipe *Spirit of Berlin* (ROJAS, 2005).

O módulo GPS/IMU é um dispositivo que fornece as coordenadas em que se encontra o veículo, com auxílio do GPS e a velocidade e orientação, por meio de acelerômetros e giroscópios do módulo IMU.

O sensor laser de varredura (*Light Detection And Ranging* - LIDAR) utilizado pela equipe *Spirit of Berlin* é o modelo Lux da empresa IBEO. Este dispositivo tem um alcance de 200m, uma varredura de 85° no plano horizontal e de 3,2° no plano vertical. Ele consegue varrer quatro faixas (planos), possibilitando obter a distância e

altura do obstáculo (Figura 3.2). Em geral, este tipo de sensor é utilizado para detectar os obstáculos que se encontram a médias e longas distâncias, à frente do veículo autônomo. Com o uso do laser, não há prejuízo na coleta de informações do ambiente em caso de pouca ou nenhuma luminosidade.

Figura 3.2: Representação da varredura vertical do sensor LUX IBEO - utilizados pela equipe Spirit of Berlin.

O trabalho de URMSON (2008) apresenta os sensores utilizados no veículo autônomo denominado *Boss*, o qual foi o vencedor do DARPA *Urban Challenge*, utilizando onze sensores laser de três tipos diferentes.

A câmera de vídeo é utilizada para detectar faixas da pista, veículos, pessoas e outros obstáculos. Ela é essencial na identificação de sinais de trânsito. O uso de mono-visão tem dificuldade em estimar com precisão a distância dos diversos obstáculos. Alguns trabalhos utilizam visão estéreo para aumentar a eficiência na estimação de distâncias. Contudo, isso aumenta muito o tempo de processamento de imagens. Em relação ao alcance, a câmera pode ser utilizada em várias faixas de distância, chegando até a 60 m. ATREYA *et al.* (2007) apresentam as informações técnicas de um veículo autônomo que também participou da competição organizada pelo DARPA, podendo-se observar o uso de seis câmeras de vídeo, cujas principais características são apresentadas na Tabela 3.1.

A Figura 3.3 mostra a área de atuação dos diversos sensores utilizados no veículo autônomo desenvolvido pela equipe da Universidade de Princeton. O veículo é representado por um pequeno retângulo vermelho. A área verde representa o alcance do sensor radar, utilizado a fim de detectar a posição e a velocidade de obstáculos à frente do veículo, distantes até 150 m. As áreas nas cores lilás, verde piscina, laranja e roxo mostram os locais de atuação das câmeras de vídeo, sendo 60 m o alcance máximo das mesmas. O retângulo azul representa a área de atuação de um sensor radar, ele é instalado na parte traseira do veículo e cobre uma área de 6m x 2,75 m.

Tabela 3.1: Características das câmeras utilizadas no veículo autônomo.

Marca/Modelo	Raio	Abertura angular	Qtd	Emprego
<i>Point Grey Flea 2</i> (vide área de cor lilás Fig 3.3)	45 m	60° (*)	1	Montada sobre o teto do carro é utilizada para detecção de veículos e de faixas da pista
<i>Point Grey XB3</i> (vide área de cor laranja Fig 3.3)	60 m	50°	1	Montada sobre o capô do carro é utilizada para detecção de veículos e de faixas da pista
<i>Point Grey Bumblebees</i> (vide área de cor verde piscina Fig 3.3)	30 m	50°	2	Montadas sobre o capô do carro são utilizadas para detecção de veículos e de faixas da pista, focando as laterais e frente da pista
<i>Point Grey Firefly MV</i> (vide área de cor roxa Fig 3.3)	20 m	60°	2	Montadas na traseira do veículo para detecção de obstáculos e para auxiliar em manobras de troca de faixa

(*): Esta câmera é montada sobre uma base giratória, sendo capaz de fazer uma varredura de 180°.

Figura 3.3: Representação do alcance dos sensores utilizados pela equipe de Princeton (ATREYA *et al.* 2007).

Em URMSON *et al.* (2008) podem ser observados os sensores utilizados no veículo “Boss”, vencedor do DARPA *Urban Challenge*. Utiliza-se uma combinação de dezoito sensores para realizar a percepção do ambiente, garantindo a segurança

pela redundância de diversos dispositivos. Os sensores ativos (laser e radar) são os mais empregados nesse trabalho em virtude da grande precisão em realizar medições de distância e pela velocidade no processamento dos dados em comparação com as câmeras. As características e as posições dos sensores empregados no veículo Boss podem ser acompanhadas pela Tabela 3.2 e pela Figura 3.4.

Figura 3.4: Sensores usados pela equipe vencedora do DARPA *Urban Challenge* (URSOM *et al.*, 2008).

Tabela 3.2: Características dos sensores utilizados no veículo autônomo que venceu a última competição DARPA *Urban Challenge*.

Tipo	Modelo/ Marca	Qtd	Alcance Máx.	Abertura Angular Máx.	Utilização
Laser	Sick LMS 291	06	80 m	180°	Deteção de obstáculos frontais, traseiros e laterais
	Velodyne HDL-64	01	70 m	360° x 26°	Mapeamento tridimensional do ambiente
	Continenta I ISF 172	02	150 m	14°	Deteção de obstáculos frontais
	IBEO Alasca XT	02	300 m	240° x 3,2°	Deteção de obstáculos frontais
Vídeo	Point Grey Firefly (PGF)	02	-	45°	Deteção de obstáculos frontais e identificação de sinalização
Radar	Continenta I ARS 300	05	200 m	60° x 3,2°	Deteção de obstáculos frontais, traseiros e laterais
GPS/ IMU	Applanix Pos LV (APLV)	01	-	-	Detectar o posicionamento global e a aceleração das rodas

3.1 SENSOR LASER SICK LMS-291

O sensor laser Sick LMS-291 foi empregado na detecção de obstáculos neste trabalho. Os resultados obtidos podem ser verificados no Capítulo 5.

Este dispositivo é empregado em diversos trabalhos sobre veículos autônomos e semi-autônomos. Na maioria dos casos é utilizado para detectar obstáculos que se encontram à frente do veículo. Os veículos autônomos que participaram do DARPA *Urban Challenge* não utilizaram este tipo de sensor para fazer a detecção de pessoas, pois esta finalidade não fazia parte dos objetivos dessa competição. No entanto, alguns estudos empregam o sensor laser Sick para detectar pessoas, um exemplo dessa aplicação pode ser observada em NAVARRO-SERMENT (2007). Isso demonstra a grande versatilidade do laser em detectar obstáculos.

O sensor opera através da medição do tempo de ida e volta de pulsos de luz laser. Um feixe de laser pulsado é emitido e refletido aonde se encontra um objeto. A reflexão é registrada pelo módulo receptor do sensor. O tempo entre a transmissão e a recepção do impulso é diretamente proporcional à distância entre o Sick LMS e o objeto. Com auxílio de um espelho rotativo integrado, o laser é emitido para todas as direções, mapeando uma área de até 180° (Figura 3.5).

Figura 3.5: Representação da varredura de 180° do sensor laser Sick LMS-291 (manual do sensor Sick LMS).

O contorno dos objetos-alvo é determinado na sequência de impulsos recebidos. As medidas são tomadas a cada 0,25°, 0,5° ou 1°, dependendo da configuração do software. Os dados da medição estão disponíveis em tempo real para posterior avaliação através da interface de dados. A velocidade de transmissão de dados pode chegar até 500 kbps.

Há dois fatores que afetam o alcance efetivo. Eles são a divergência no local e a refletividade. A refletividade do objeto é, assim, crucial para a distância em que o objeto pode ser detectado. O gráfico da Figura 3.6 mostra a relação entre o material do objeto e o alcance do sensor.

O sensor pode se comunicar usando os protocolos RS232 ou RS 422. A comunicação RS232 é usada por um computador padrão, mas tem uma velocidade de transferência de dados menor e uma distância limitada a 15 metros. O RS422 tem uma maior velocidade e alcance de aproximadamente 1000 metros.

Figura 3.6: Refletividade de alguns tipos de materiais e alcance do sensor versus refletividade (extraído do manual do sensor laser Sick LMS).

4 DETECÇÃO E RASTREAMENTO DE OBSTÁCULOS COM USO DE SENSOR LASER

A detecção e o rastreamento de obstáculos é uma função importantíssima para veículos autônomos ou semi-autônomos. Funcionalidades como ACC, *Stop and Go* e *Collision Avoidance*, vistos na Sub-Seção 2.3.1, também carecem de um sistema confiável de detecção e rastreamento de obstáculos.

O que se propõe neste trabalho é desenvolver um programa computacional capaz de detectar e rastrear veículos, recebendo dados coletados do ambiente de um sensor laser Sick LMS.

O sistema para detecção e rastreamento de obstáculos é composto por quatro blocos de funções, como pode ser observado na Figura 4.1. O bloco Sensor Laser é composto essencialmente por: sensor laser Sick LMS-291, fonte de alimentação, cabos de comunicação e de alimentação e conversor RS 232-USB. O bloco Detecção de Obstáculos e Rastreamento de Obstáculos é composto por *hardware e software*. A parte de hardware refere-se ao microcomputador com sistema operacional *Linux* e software *Matlab*. A parte do programa se refere às funcionalidades em detectar os obstáculos e realizar o rastreamento dos mesmos com auxílio do Filtro de Kalman. O deslocamento dos obstáculos pode ser visualizado no bloco IHM, que recebe todos os sinais processados pelos blocos anteriores e os mostra na tela do computador.

Figura 4.1: Principais módulos de um sistema de detecção de obstáculos com uso de laser.

4.1 TESTES REALIZADOS COM O SENSOR LASER

Como visto na Seção 2.4, uma das condições para que se possa utilizar o Filtro de Kalman é o fato do ruído da medição ser gaussiano. Assim, foram realizados alguns testes com o intuito de verificar o comportamento dos dados de medição obtidos pelo sensor laser LMS-291.

Para estes testes foram utilizados três objetos a uma distância inicial de 5 m e em seguida 10 m. Os objetos utilizados foram placas de madeira pintadas de branco, com 2,10 m de altura e 1,30 m de largura. A Figura 4.2 apresenta a disposição dos objetos em relação ao sensor. O1, O2 e O3 representam os obstáculos colocados a 45°, 90° e 135°, respectivamente. A distância desses ao sensor é representada por r , que no primeiro teste tinha valor de 5 m e no segundo de 10 m.

Figura 4.2: Disposição dos obstáculos (O1,O2 e O3) distantes a uma distância r (5 ou 10 m) do sensor laser.

Visando realizar uma comparação mais apropriada entre os histogramas dos dados coletados para cada obstáculo, resolveu-se realizar a padronização dos dados, ou seja, sendo x , o vetor que armazenou os dados para cada medição, tem-se que z , obtido pela equação (4.1), é uma distribuição normal padronizada, em que μ e σ representam a média e o desvio padrão.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.1)$$

As Figuras 4.3 a 4.8 apresentam os histogramas dos dados padronizados coletados nos testes realizados. Em cada figura também é mostrada a curva normal com média zero e desvio padrão unitário.

Figura 4.3: Histograma dos dados padronizados dos 15 mil pontos coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 5 m de distância e a 45° e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Figura 4.4: Histograma dos dados padronizados dos 15 mil pontos coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 5 m de distância e a 90° e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Figura 4.5: Histograma dos dados padronizados dos 15 mil pontos coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 5 m de distância e a 135° e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Figura 4.6: Histograma dos dados padronizados dos 15 mil pontos coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 10 m de distância e a 45° e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Figura 4.7: Histograma dos dados padronizados dos 15 mil pontos coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 10 m de distância e a 90° e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Figura 4.8: Histograma dos dados padronizados dos 15 mil pontos coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 10 m de distância e a 135° e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Pela análise visual das figuras, percebe-se que os histogramas são parecidos com uma distribuição normal. Mesmo para distâncias e ângulos diferentes não há modificações significativas. Assim, pode-se empregar o filtro de Kalman.

4.2 TRABALHOS SOBRE RASTREMENTO DE OBSTÁCULOS COM SENSOR LASER EMPREGANDO FILTRO DE KALMAN

O uso do Filtro de Kalman foi empregado no trabalho de XIANG (2001) para o rastreamento de obstáculos durante o deslocamento de um veículo em estradas de terra. Utilizaram-se dois sensores laser Sick LMS, instalados na parte superior frontal e no para-choques de um veículo (Figura 4.9).

Os dados coletados dos sensores são convertidos para a formação de um mapa 2D. Neste, os pontos medidos são mostrados isoladamente. Inicialmente, é feito um agrupamento dos pontos mais próximos, considerando-se uma distância menor ou igual a 80 cm, na tentativa de detectar o obstáculo. Utiliza-se a técnica dos mínimos quadrados para encontrar uma reta para cada um dos grupos encontrados, que são considerados como obstáculos. Forma-se um retângulo, utilizando-se a reta encontrada como diagonal. Os pontos (x_n, y_n) representam as coordenadas do ponto central de cada um dos obstáculos.

Fig. 4.9: Veículo acoplado com dois sensores laser (XIANG,2001).

Devido aos impactos sofridos pelo veículo, a intensidade do ruído de medição é elevada. Desta forma, utilizou-se o Filtro de Kalman para estimar as coordenadas dos pontos centrais dos obstáculos. Seja $Z_n = (x_n, y_n)^T$ e assumindo-se que o veículo siga uma linha reta em velocidade constante, tem-se que:

$$\begin{cases} Z_k = Z_{k-1} + h \dot{Z}_{k-1} \\ \dot{Z}_k = \dot{Z}_{k-1} = (Z_{k-1} - Z_{k-2}) / h \\ Y_k = Z_k + V_k \end{cases} \quad (4.2)$$

Neste caso, h representa o tempo de amostragem, Y_k o vetor de observação e V_k o ruído gaussiano na medição. Sendo $X_k = [Z_k, Z_{k-1}]^T$, a equação (4.2) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{cases} X_k = AX_{k-1} \\ Y_k = HX_{k-1} \end{cases} \quad (4.3)$$

A equação (4.3) pode ser aplicada no algoritmo do Filtro de Kalman, sendo as matrizes $B=0$, $A = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ e $C = H = [1 \ 0]$.

Para verificar o desempenho do Filtro de Kalman, XIANG (2001) realizou testes com o veículo em linha reta com velocidade constante de 40 km/h. Todos os obstáculos, inseridos à frente do veículo, eram estáticos. A diferença entre dois pontos consecutivos centrais do mesmo obstáculo na direção y , a cada amostra sucessiva, era de 44 cm (devido ao deslocamento do veículo). O tempo de amostragem foi de 40 ms. Considerou-se $(\Delta x, \Delta y)$ a diferença da posição central do obstáculo durante duas amostras consecutivas e (e_x, e_y) os erros de posição, dados pelas seguintes expressões: $(e_x, e_y) = \Delta y - 44$ e $e_x = \Delta x$. Os gráficos da Figura 4.10 mostram os erros de posição antes e depois do filtro de Kalman. A linha mais escura mostra os resultados obtidos com o uso do filtro. Pode-se notar que os erros são muito menores com o uso do filtro e diminuem com o aumento do número de amostras.

Fig. 4.10. Resultados obtidos com e sem o uso do Filtro de Kalman (XIANG, 2001).

O trabalho de CHENG (2007) desenvolveu um método para estimar a posição, a velocidade e a aceleração de obstáculos que se encontram à frente do veículo, utilizando-se um único sensor laser. Inicialmente, foi desenvolvida uma função que relaciona a distância com o ângulo que o obstáculo tem em relação ao veículo. O modelo do sistema é obtido conforme se segue:

$$\begin{cases} X_k = FX_{k-1} + G.v \\ Z_k = h(X_k) + w \end{cases} \quad (4.4)$$

O vetor de estados no tempo k é definido como:

$$X_k = [x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k]^T \quad (4.5)$$

Valendo-se das equações do movimento uniforme da Mecânica, pode-se encontrar a matriz de transição de estados F .

4.3 PROPOSTA DE RASTREAMENTO UTILIZANDO FILTRO DE KALMAN

A Figura 4.11 apresenta uma visão mais detalhada da arquitetura do sistema. O sensor laser é instalado em um local onde se deseja detectar e rastrear os objetos de interesse e os seus dados são processados pela rotina de detecção e rastreamento, representado pelos módulos no interior do retângulo tracejado. O resultado pode ser observado em uma interface homem-máquina (IHM), permitindo que se acompanhe em tempo real a presença e movimentação de obstáculos dentro do raio de alcance do sensor. Esses dados podem ainda ser enviados a outro sistema, como por exemplo, na fusão de dados com outros sensores em aplicações de veículos autônomos (Cheng *et al*, 2007).

Figura 4.11. Visão geral do sistema de detecção e rastreamento de obstáculos.

4.3.1 AGRUPAMENTO DE PONTOS E DETERMINAÇÃO DO PONTO MÉDIO DE CADA OBSTÁCULO

Antes de tudo, é preciso saber quais os tipos de objetos que se deseja detectar. O tamanho dos obstáculos influencia de forma significativa, pois ao receber os dados brutos oriundos de cada varredura do sensor, o agrupamento de pontos para se definir um obstáculo será de acordo com as distâncias entre dois pontos consecutivos.

Pontos pertencem ao mesmo grupo quando a distância entre dois pontos vizinhos é inferior a um valor pré-estabelecido D . Este valor varia conforme a distância em que os pontos se encontram do laser.

Analisando-se as Figuras 4.12 e 4.13, pode-se verificar a influência da distância pré-definida D como base para realizar a confirmação de um obstáculo. Dependendo do valor de D , pode-se detectar mais ou menos obstáculos com os dados oriundos do sensor, podendo ser diferente da quantidade de obstáculos existentes. Assim, o valor de D deve ser adequado a cada situação.

Figura 4.12: Representação de 3 grupos ou obstáculos para um determinado valor de D .

Figura 4.13: Representação de 2 grupos ou obstáculos para um determinado valor de D maior que o definido na Figura 4.12. Os grupos 1 e 2 da figura 4.12 foram fundidos em um só grupo neste caso.

Após o agrupamento dos pontos obtidos com a finalidade de se definir obstáculos, é necessário encontrar o ponto médio desses obstáculos, que são representadas por xm_i e ym_i . O algoritmo utilizado para agrupar os dados do sensor é apresentado a seguir:

Algoritmo de **Detecção de Obstáculos**

Entre com o valor de D // *distância entre pontos*

Ler X e Y // sensor fornece as matrizes X e Y , de dimensão $n \times 1$, com as coordenadas de cada ponto detectado.

Para $i=1$ até n

Se a distância entre z_i e $z_{i+1} < D$ // $z_i = [x_i \ y_i]$

Então z_i pertence ao grupo G_i

Senão z_i pertence ao grupo G_{i+1}

Fim

Para $i=1$ até n

xm_i = abscissa ponto médio de G_i

ym_i = ordenada do médio de G_i

Fim

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram um exemplo de detecção de obstáculos estáticos obtido com o programa sugerido neste trabalho. O objetivo nesse momento é apenas frisar que a escolha adequada da distância D é muito importante para gerar a situação real de obstáculos em cada varredura do sensor. Foram inseridas três caixas de madeira com dimensões 0,90 x 0,80 x 0,60 m em uma rua. O sensor laser foi instalado na posição central da rua e configurado para um alcance de 8,2 m e resolução angular de 0,25° e 100° de varredura horizontal. A cada varredura, o sensor envia ao computador 400 pontos com coordenadas x e y . Para um valor de $D=10$ cm, foram detectados 31 obstáculos, um número muito superior à realidade (Figura 4.14).

Figura 4.14: Detecção de obstáculos estáticos com uso de sensor laser: para $D=10$ cm são encontrados 31 grupos ou obstáculos.

Alterando-se o valor de D para 40 cm, puderam ser observados seis obstáculos. As três caixas de madeira foram detectadas, além de troncos de árvores que se encontravam nas laterais da pista (Figura 4.15).

Figura 4.15: Detecção de obstáculos estáticos com uso de sensor laser: para $D=40$ cm são encontrados 6 grupos ou obstáculos. As três caixas de madeira são os três retângulos mais no centro.

4.3.2 CONFIRMAÇÃO DO PONTO MÉDIO

Quando existem obstáculos em movimento é necessário ter uma preocupação com o seu posicionamento durante todo o percurso. Em cada varredura podem ser identificados vários obstáculos. Estes são numerados conforme seu posicionamento, a fim de viabilizar o rastreamento. O objeto mais à direita passa a ser o primeiro obstáculo, já o mais à esquerda é considerado o último. Isso é em virtude da operação do sensor, que faz a varredura da direita para a esquerda, conforme Figura 3.5.

A Figura 4.16(a) mostra uma situação particular de dois veículos se aproximando do sensor. Inicialmente, apenas o veículo da esquerda se encontra dentro do seu raio de alcance, simbolizado pela linha pontilhada. Assim ele é definido como obstáculo 1. Instantes mais tarde, os dois estão na área de atuação do sensor, como pode ser verificado na Figura 4.16(b). Nessa situação, o veículo da direita passa a ser o primeiro obstáculo, por estar à direita do sensor e o outro carro como o segundo. Esse problema inviabilizaria o rastreamento, pois o veículo da esquerda, que era o primeiro, passa a ser o segundo obstáculo com a presença do outro carro.

Figura 4.16. Dois veículos se aproximando do sensor laser.

Para resolver esse impasse é necessário criar uma rotina para confirmar o ponto médio do obstáculo que está se rastreando, representado pelas coordenadas retangulares xm_{ik} e ym_{ik} , em que i representa os obstáculos de cada coleta de dados do sensor e k representa a atual varredura. Seja $P_k = [p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{ik}]$ o vetor que armazena os pontos médios dos i obstáculos encontrados na k -ésima varredura, em que $p_{ik} = (xm_{ik}, ym_{ik})$. Seja P_{k+1} o vetor que armazena os pontos médios dos i obstáculos encontrados na $(k+1)$ -ésima varredura.

Para garantir que os obstáculos rastreados sempre tenham a mesma posição dentro do vetor, é preciso comparar todos os elementos dos vetores P_k e P_{k+1} . Toma-se o primeiro elemento de P_k e calculam-se as distâncias entre ele e todos os elementos de P_{k+1} . O elemento de P_{k+1} que possui a menor distância, passa a ser o primeiro elemento de um vetor auxiliar $Vaux$. Faz-se isso com os demais elementos de P_k . Ao final, assume-se que $P_{k+1} = Vaux$. Isso corrige o problema inicial, pois a diferença de posição dos obstáculos em relação à próxima varredura geralmente é muito pequena.

4.3.3 MEDIÇÃO DA VELOCIDADE

O cálculo da velocidade dos objetos, nos eixos x e y, é realizado conforme as equações (4.6) e (4.7), em que h representa o tempo de varredura do sistema.

$$\dot{x}m_{ik} = \frac{xm_{ik} - xm_{i(k-1)}}{h} \quad (4.6)$$

$$\dot{y}m_{ik} = \frac{ym_{ik} - ym_{i(k-1)}}{h} \quad (4.7)$$

Essas informações são úteis na aplicação do filtro de Kalman, apresentado na Sub-Seção 4.3.4.2.

4.3.4 RASTREAMENTO DOS OBSTÁCULOS

O rastreamento basicamente é feito por meio do armazenamento dos pontos médios dos obstáculos encontrados nos vetores P . No entanto, essas posições são obtidas apenas baseadas nos dados oriundos do sensor. Ruídos ou outras perturbações como oclusões podem gerar erro no sistema. Dessa forma, é necessário aplicar outras técnicas a fim de aumentar a confiabilidade do software. Neste trabalho, para realizar o rastreamento, empregam-se o filtro de Kalman e uma função para corrigir grandes erros de posicionamento, chamada de Corretor de Discrepâncias ou simplesmente Corretor.

4.3.4.1 Corretor de Discrepâncias

A maior preocupação deste trabalho é rastrear veículos. Sabe-se que seus deslocamentos seguem um determinado padrão. Assim, consegue-se identificar variações bruscas nesse comportamento. Quando um veículo sendo rastreado passa por uma área onde há uma barreira entre ele e o sensor, por alguns instantes, não é possível detectar a sua posição. Neste caso, as suas últimas posições apresentam pequenos erros, pois nos instantes em que o veículo é parcialmente coberto, haverá erro na determinação do valor médio de sua posição e, conseqüentemente, da sua velocidade, que tende a diminuir, conforme se pode observar na Figura 4.17. Como o filtro de Kalman não é capaz de corrigir variações muito bruscas, é preciso fazer uma melhoria antes da aplicação do filtro.

Figura 4.17. Veículo passando por trás de uma barreira.

Para cada obstáculo, a média das distâncias entre as suas últimas cinco posições m_i é observada. Quando a distância entre duas posições sucessivas de um objeto $p_{i(k-1)}$ e p_{ik} for maior que três vezes m_i , então se aplica a correção, conforme explicado a seguir. As médias das dez últimas velocidades dos obstáculos, Vxm_i e Vym_i , obtidas por meio de $\dot{x}m'_{ik}$ e $\dot{y}m'_{ik}$, que são as velocidades nos eixos x e y após a aplicação do filtro de Kalman, são frequentemente atualizadas. Ao verificar que há uma discrepância entre $p_{i(k-1)}$ e p_{ik} , despreza-se o valor p_{ik} e atribui-se a ele um novo valor, conforme equações (4.8) e (4.9).

$$xm_{ik} = xm'_{i(k-1)} + (Vxm_i)h \quad (4.8)$$

$$ym_{ik} = ym'_{i(k-1)} + (Vym_i)h \quad (4.9)$$

Esses novos valores de xm_{ik} e ym_{ik} são usados no algoritmo de Kalman para encontrar xm'_{ik} e ym'_{ik} , conforme é explicado a seguir.

4.3.4.2 Filtro de Kalman

Para a aplicação do filtro de Kalman considera-se que o sistema seja linear e perturbado por ruído gaussiano.

$$x_k = A_k x_{k-1} + \varepsilon \quad (4.10)$$

$$y_k = C_k x_k + \delta \quad (4.11)$$

A equação (4.10) mostra como as variáveis de estado x_k evoluem em função do estado anterior e da ação de controle. A matriz A_k descreve como o estado evolui de k para $k+1$, baseado apenas no estado anterior. As matrizes A_k e C_k são determinísticas. Essa equação é utilizada para modelar o estado no emprego do filtro de Kalman. A equação (4.11) modela as variáveis de estado medidas e também precisa ser linear e perturbada por ruído gaussiano. Os vetores ε e δ das equações (4.10) e (4.11) representam o ruído do processo e da medição, respectivamente, com média zero, independentes e com covariância R e Q .

A fim de se analisar o ruído produzido pelo dispositivo de medição, mil coletas de dados foram realizadas de um veículo, que foi utilizado nos testes em movimento (vide Capítulo 5), distante a 15 metros do sensor laser. Considerou-se apenas os pontos a 90° da varredura do sensor, ou seja, os pontos bem à frente do sensor.

Esses mil pontos foram armazenados em um vetor e, com os dados padronizados do mesmo, obteve-se o histograma apresentado na Figura 4.18. Nota-se que o histograma, assim como nos casos apresentados na Seção 4.1, aproxima-se de uma distribuição normal, possibilitando o emprego do filtro de Kalman. A média encontrada foi de 15,0207 m, podendo ser desprezível esse erro com relação à distância real, mesmo porque essa distância foi medida com uma trena e pode apresentar um pequeno erro. Ao subtrair os valores do vetor pela média, obtém-se o ruído de medição, cujo histograma é apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.18. Histograma dos dados padronizados coletados do sensor laser LMS-291 para um objeto a 15 m de distância e a curva normal produzida com média zero e desvio padrão 1.

Figura 4.19 Histograma do ruído do sensor laser LMS-291 para um objeto a 15 m de distância.

A Tabela 4.1 apresenta alguns parâmetros como média e desvio padrão dos mil dados coletados do sensor a uma distância de 15 m. Nota-se que o valor obtido pela subtração do ponto máximo pelo mínimo é de 7,80 cm, ou seja, um valor muito pequeno, considerando que o principal objetivo é detectar e rastrear veículos. Outro parâmetro importante apresentado nessa tabela é a variância. Esse valor é utilizado como ε , isto é, o ruído da medição para a aplicação do filtro de Kalman.

O resultado do filtro de Kalman representa a crença (*belief*) de que um obstáculo possa estar em uma determinada posição e é representado como uma distribuição normal com média μ_k e matriz covariância Σ_k .

Tabela 4.1 – Parâmetros obtidos da medição a 15 m do sensor.

Média	15,0207 m
Desvio Padrão	0,9628 cm
Variância	0,0093 cm
Valor Máximo	15,0670 m
Valor Mínimo	14,9890 m
Valor Máximo subtraído da Média	4,63 cm
Média subtraída do Valor Mínimo	3,17 cm
Valor Máximo subtraído do Valor Mínimo	7,80 cm

O algoritmo do filtro de Kalman utilizado neste trabalho é o mesmo apresentado na Seção 2.4, considerando-se os seguintes parâmetros:

$$y_{ik} = [xm_{ik}, \dot{x}m_{ik}, ym_{ik}, \dot{y}m_{ik}]^T, \quad B = 0$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & h & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varepsilon \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \mu_{i0} = [xm_{i0}, 0, ym_{i0}, 0]^T.$$

O resultado do filtro é armazenado no vetor

$$\mu_k = X'_{ik} = [xm'_{ik}, \dot{x}m'_{ik}, ym'_{ik}, \dot{y}m'_{ik}]^T.$$

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados alguns testes práticos realizados a fim de verificar o desempenho do software de rastreamento de obstáculos. Em todos os testes foram utilizados os seguintes equipamentos:

- ✓ Sensor laser Sick LMS-291, configurado para um alcance de 80 m, varredura de 180° e resolução angular de 0,5°, posicionado a 40 cm acima do solo.
- ✓ Veículo Ford Fiesta modelo 2007, cor prata, dimensões: 4,20 x 1,76 x 1,46 m.

Durante os testes o motorista teve apenas o auxílio do velocímetro interno do carro para manter o carro na velocidade estipulada, gerando dessa forma erro em virtude da imprecisão do aparelho e da dificuldade de se manter o veículo com direção e velocidade constantes. Utilizou-se $\varepsilon=0,00009$ e $\delta=0,00003$ ($\varepsilon = 3 \delta$). O valor de ε foi extraído da variância do ruído do sensor, conforme Tabela 4.1. Trabalhou-se com uma velocidade de transmissão de dados do sensor de 38.400 kbps.

5.1 TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE CONSTANTE DE 20 km/h EM LINHA RETA

O primeiro teste realizado foi de um veículo se aproximando do sensor com velocidade constante de 20 km/h. A pista de teste tinha uma ligeira curva no início e 40 m de reta, conforme Figura 5.1. O veículo começou a acelerar de forma a chegar à reta da pista a uma velocidade de 20 km/h e manteve-se nesse ritmo até passar pelo sensor. Em relação ao eixo x, o veículo na reta ficou a 3 metros do sensor.

Figura 5.1. Um veículo se aproximando do sensor a 20 km/h.

A Figura 5.2 mostra os resultados obtidos com a rotina de rastreamento. Os losangos simbolizam a posição do veículo obtida dos dados do sensor durante 42 varreduras. Os pontos são as posições do veículo obtidas pelo módulo de rastreamento, ou seja, usando o Corretor de Discrepâncias e do filtro de Kalman. A primeira posição observada do veículo foi a 51,6 m do sensor. Para não processar pontos indesejáveis, foram descartados os que estavam fora da pista.

Figura 5.2. Um veículo se aproximando do sensor a 20 km/h.

Nota-se que mesmo após o veículo entrar na reta a 40 m do sensor, houve uma variação de cerca de 1 m no eixo x. Isso se deve basicamente a dois fatores. O primeiro é em virtude de erro humano na condução do veículo e o segundo é pelo motivo do sistema apresentar um pequeno erro na obtenção do ponto médio. A Figura 5.3 mostra as medições feitas pelo laser de um mesmo veículo a distâncias

diferentes. Pode-se verificar na Figura 5.3(a) que apenas três pontos são obtidos de um veículo a cerca de 41,5 m do sensor, conseguindo-se ver apenas a frente do mesmo. Quando o carro chega a cerca de 1,5 m do sensor, muitos pontos são obtidos, podendo-se notar claramente o contorno das partes frontal e esquerda do mesmo. Como neste trabalho a posição do veículo é obtida pelo ponto médio de todos os pontos presentes em uma varredura, gera-se uma imprecisão em relação ao real local em que se encontra o objeto.

Figura 5.3. Medições feitas pelo sensor laser de um mesmo veículo. (a) apenas 3 pontos são obtidos pelo laser a cerca de 41,5 m de distância e (b) diversos pontos coletados a uma distância de cerca de 1,5 m, o contorno da frente e do lado esquerdo do veículo.

A Figura 5.4 mostra uma comparação entre os pontos médios da posição do veículo, no eixo y, obtidos pelo software, utilizando o módulo de rastreamento, com a equação que rege o movimento retilíneo uniforme com velocidade de 20 km/h (linha contínua). Foram considerados os primeiros 28 dados coletados a partir do momento em que o veículo chegou a uma distância de 40 m do sensor. A velocidade média no eixo y obtida pelo software foi de 20,57 km/h e o máximo erro absoluto entre a posição medida e a reta $S=40-5,55t$ foi de 1,48 m, sendo a média de 0,8 m.

Figura 5.4. Comparação do deslocamento real do veículo (+) com a equação $S=40-5,55t$ (linha contínua).

5.2 TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE DE 20 km/h ULTRAPASSANDO UM VEÍCULO PARADO

O objetivo desse teste é verificar como o sistema se comporta quando existe uma barreira entre o sensor e o obstáculo sendo rastreado. O veículo mais distante do sensor laser na Figura 5.5 representa o veículo a ser rastreado, que trafega a 20 km/h na direção do eixo x e o outro veículo está parado.

Figura 5.5. Representação da configuração do teste com um veículo em movimento e o outro parado.

Na Figura 5.6 verificam-se os pontos médios do veículo no eixo x obtidos com o uso do filtro de Kalman e do Corretor e a reta $S=-32,5+5,55t$ (linha contínua), que representa o deslocamento do veículo, com uma velocidade de 20 km/h. Há pequenas diferenças entre as linhas, que decorrem da passagem do veículo atrás

da barreira, fazendo com que os dados da medição sejam interrompidos e, também em virtude da incerteza do deslocamento real do veículo.

Figura 5.6. Comparação do deslocamento estimado do veículo (+) com a equação $S = -32,5 + 5,55t$ (linha contínua).

Na Figura 5.7(a) há um grande espaçamento entre os losangos no intervalo de $-4 < x < 4$. Esses losangos representam a posição registrada do veículo sem usar o módulo de rastreamento. Os pontos representam a posição do veículo empregando o filtro de Kalman, contudo, sem utilizar a função Corretor. O sensor laser não consegue enxergar o veículo em movimento quando ele passa por trás da barreira, retornando dois valores nulos. O filtro de Kalman não consegue corrigir o posicionamento do veículo neste caso. Antes de entrar na barreira, o carro percorria em média 1,10 m a cada varredura. A distância entre o último ponto medido antes do veículo entrar atrás da barreira e o primeiro ponto ao sair da mesma foi de 6,8 m. O uso do Corretor de Discrepâncias e, em seguida, o filtro de Kalman gera um melhor rastreamento. Os resultados são vistos na Figura 5.7(b). Há uma diminuição da distância máxima entre dois pontos sucessivos, que nesse caso foi de 2,6 m em vez de 6,8 m.

Figura 5.7. Posição do veículo a cada varredura (a) só com filtro de Kalman e (b) com Corretor de Discrepâncias e filtro de Kalman.

5.3 TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE INICIAL DE 40 km/h APROXIMANDO-SE DO SENSOR E FAZENDO UMA CONVERSÃO EM “U”

A finalidade desse teste é observar como o sistema se comporta com um deslocamento diferente da linha reta como nos testes anteriores. O veículo entra em linha reta na área do alcance do sensor a uma velocidade de 40 km/h, vai desacelerando, realiza uma conversão em “U” a cerca de 10 metros do sensor e pára logo em seguida. A figura 5.8 apresenta a movimentação do veículo nesse caso.

Figura 5.8. Veículo se aproximando do sensor e realizando uma conversão em U.

Pode-se considerar que os resultados obtidos nessa situação foram razoáveis, podendo-se notar a conversão em “U” feita pelo veículo, conforme mostra a Figura 5.9. Como não havia outro instrumento confiável para medição de velocidade e posição, não se podem estimar os erros reais desses posicionamentos obtidos pelo sistema.

Figura 5.9. Veículo se aproximando do sensor e realizando uma conversão em U. Os losangos representam a posição do veículo utilizando somente as informações do sensor. Os pontos em vermelho representam a posição do veículo, utilizando o Filtro de Kalman e Corretor de Discrepâncias, sendo $\varepsilon=0,00009$ e $\delta=0,00003$.

Nesse tipo de manobra fica evidente a diferença que se tem no valor de δ para a aplicação do Filtro de Kalman. Quanto maior o valor de δ , significa que a

equação de estados que rege o movimento não é a mais adequada, assim, as posições obtidas com o filtro ficarão mais próximas das posições obtidas apenas com o uso do sensor. Para um valor de $\delta=0,0006$ e $\varepsilon=0,00009$, pode-se notar na Figura 5.10(a), que os pontos ficam bem próximos do centro dos losangos, ou seja, os valores obtidos com o filtro de Kalman são bem próximos das posições conseguidas apenas com o uso do sensor. A Figura 5.10(b) mostra uma comparação com as posições do veículo obtidas com e sem o filtro de Kalman, $\delta=15 \cdot 10^{-7}$ e $\varepsilon=0,00009$. Nota-se que o filtro de Kalman, neste caso, sendo o ruído da medição muito superior ao ruído das equações de estado, faz com que os pontos estimados se distanciem do movimento real do veículo. Pode-se verificar que alguns pontos da figura 5.10(b) quase se aproximam da marca dos 5 metros no eixo das ordenadas. Isso ocorre porque o filtro de Kalman considera que há muito ruído na medição e “privilegia” as informações das equações de estado.

Figura 5.10. Veículo se aproximando do sensor e realizando uma conversão em U. (a) sendo $\varepsilon=0,15\delta$ e (b) com $\varepsilon=60\delta$.

5.4 TESTE COM UM VEÍCULO A VELOCIDADE DE ATÉ 70 km/h

Nesse caso, tentou-se chegar com a máxima velocidade possível dentro da área de teste. Devido à limitação da pista, a máxima velocidade observada no velocímetro foi próxima a 70 km/h. O objetivo é verificar apenas como o sistema responde com velocidades maiores.

Utilizando-se o valor $D=1$ m, como nos casos anteriores, o resultado do agrupamento de pontos não foi satisfatório. Foram feitas onze observações sobre a

posição do veículo. Em uma dessas o sistema acusou que havia dois obstáculos em vez de um. Isso ocorreu porque provavelmente durante a varredura, em uma certa posição do veículo, o laser não conseguiu detectar uma parte do veículo, ocasionando um erro na detecção do obstáculo. Neste caso, só foi possível observar o número correto de obstáculos com uma distância de 1,5 m. A Figura 5.11 exemplifica esse caso.

Figura 5.11: (a) O sensor laser consegue detectar todos os pontos na frente do veículo e (b) o sensor não consegue detectar todos os pontos da frente do veículo.

Como o sensor não conseguiu detectar todos os pontos na frente do veículo, o sistema acaba entendendo que há dois obstáculos na varredura em questão em vez de um só. O caso é exemplificado na Figura 5.12. Este problema pode ser dirimido com a utilização de mais de um sensor laser.

Figura 5.12: (a) Como a distância entre os pontos coletados d é menor que D , então se entende que se trata apenas de um obstáculo. Em (b) há um caso em que d é maior que D , então o sistema entende que existem dois obstáculos.

A Figura 5.13 mostra as posições do veículo obtidas nesse caso. No eixo das abscissas houve uma variação de dois metros no deslocamento do veículo. O veículo entrou no raio de ação do sensor e seguiu em linha reta, passando ao lado do mesmo. A variação pode ser explicada pela falha na condução do veículo, já que a pista não dispunha de marcações no solo e em virtude do erro do sistema em obter o ponto médio do veículo, conforme explicado na Seção 5.2.

Figura 5.13. Posições do veículo registradas pelo sistema quando o mesmo aproximava-se do sensor com velocidade de até 70 km/h com $\varepsilon=0,03$ e $\delta=0,01$.

A figura 5.14 apresenta as velocidades medidas e estimadas do veículo no eixo da ordenadas. Foram coletadas dez medições de velocidade. Os pontos representam a velocidade estimada com o uso do filtro de Kalman. Os losangos representam as velocidades medidas, utilizando somente os pontos médios no eixo y, extraídos dos dados oriundos do sensor com auxílio do módulo de detecção de obstáculo, conforme apresentado nas seções 4.2.1 e 4.2.3.

A primeira velocidade medida foi de 62,4 km/h e a estimada foi de 33,2 km/h. Pela análise da Figura 5.14 pode-se notar que essa medição foi a que apresentou maior diferença entre a medida e a estimada. Isso ocorreu porque se utilizou $\dot{y}m_{i0}=0$, assim, apenas após algumas medições é que a velocidade estimada e a medida terão valores mais próximos.

Figura 5.14. Velocidades do veículo registradas pelo sistema quando o mesmo aproximava-se do sensor com velocidade de até 70 km/h. Os losangos são as velocidades medidas sem o uso do filtro e do corretor, os pontos são as velocidades estimadas com auxílio do filtro de Kalman e do Corretor de Discrepâncias.

Mesmo sem ter um outro equipamento ou sistema confiável para verificar o movimento real do veículo durante os testes e ao final compará-lo com os valores obtidos, pode-se considerar que os resultados obtidos são satisfatórios. Com o método utilizado conseguiu-se detectar o veículo e fazer o seu rastreamento.

Pode ser verificado que quando há perdas numa sequência de medições a respeito de um obstáculo, causadas por ruído ou oclusões, o filtro de Kalman não consegue corrigir de maneira adequada. Assim, com o método Corretor de Discrepâncias, conseguem-se melhores resultados.

6 Conclusões

Acidentes de trânsito matam milhares de pessoas por ano só no Brasil e estimam-se perdas da ordem de 10 bilhões de dólares ao ano para reparar os prejuízos desses acidentes. Quase a metade do que o país investe em saúde e quase aquilo que o governo federal gasta com educação.

Uma das formas de aumentar o nível de segurança é investir em tecnologias que sejam capazes de detectar obstáculos que possam colidir com o veículo e alertar o motorista em tempo hábil, no caso de um veículo semi-autônomo, ou o próprio veículo tomar uma decisão e realizar todos os comandos a fim de mudar a trajetória do veículo, no caso de um veículo autônomo.

Uma das necessidades dos veículos autônomos e semi-autônomos é a obtenção fidedigna e em tempo real de informações do ambiente, a fim de detectar obstáculos. Para isso, muitos sensores são utilizados, sendo um deles o laser, detalhado na Seção 2. Na Seção 3 são apresentados os principais módulos do sistema de detecção e rastreamento de obstáculos, utilizando o sensor laser Sick LMS-291 fixo ao solo.

O algoritmo desenvolvido para detectar e rastrear obstáculos trouxe resultados satisfatórios. Todos os testes foram realizados em ambientes externos, tentando simular situações reais. O uso do filtro de Kalman em conjunto com o Corretor de Discrepâncias, sendo este último uma contribuição original apresentada neste trabalho, possibilita que o rastreamento seja realizado mesmo em situações adversas, como a interrupção momentânea das leituras dos dados do sensor em virtude de uma barreira. Há necessidade, no entanto, de realizar outros tipos de manobras e situações, como acelerações bruscas do veículo, para verificar o desempenho do sistema.

O agrupamento de pontos para se definir os obstáculos pode ser melhorado utilizando-se D variável. Pontos mais próximos do sensor podem ter D menor, já os mais distantes D maior.

Um passo importante a ser dado é utilizar uma câmera de vídeo em conjunto com o laser, isso traria uma melhoria na detecção de obstáculos, bem como poderia deixar o ambiente de visualização muito mais amigável, já que poderia ser visto a imagem do ambiente com os obstáculos destacados. Além disso, podem-se utilizar

outros sensores laser para reduzir as falhas de medição como as apresentadas na subseção 5.4.

Trabalhar com os sensores em movimento, fixos em um veículo, sem dúvida, seria um grande desafio e traria grande melhoria a este trabalho. Dessa forma, o sistema daria passos importantes no sentido de ser utilizado em veículos autônomos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anuário Estatístico do Departamento Nacional de Transito DENATRAN - RENAEST 2006, www.denatran.gov.br - Portal RENAEST.
- [2] ROXO, E; BOIS, M. (2006), “A Mortalidade em Acidentes de Trânsito no Brasil”, Monografia apresentada à Associação Brasileira de Medicina do Tráfego – ABRAMET.
- [3] MELIONE, L.P.R., “Morbidade hospitalar por causas externas no Sistema Único de Saúde em São José dos Campos, SP”, Dissertação de Mestrado, USP, 2006.
- [4] EVANS, L. (1991), “Traffic Safety and the Driver”, Editora Van Nostrand Reinhold.
- [5] “European Truck Accident Causation”, International Road Transport Union (IRU), 2007.
- [6] CHENG,H., ZHENG,N., ZHANG,X. (2007), “Interactive Road Situation Analysis for Driver Assistance and Safety Warning Systems: Framework and Algorithms”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 8, nr 1, pag. 157-167.
- [7] AUFRERE,R., GOWDY,J.,MERTZ,C. (2003), “Perception for Collision Avoidance and Autonomous Driving”, Carnegie Mellon University.
- [8] LAPLANT, P. (2004), “Real-Time System Design and Analysis”, IEEE Press, 3rd ed.
- [9] KIM, S., KANG, J., OH, S., (2007), “An Intelligent and Integrated Driver Assistance System for Increased Safety and Convenience Based on All-around Sensing”, Springer Science.
- [10] MIRANDA NETO, A., ZAMPIERI, D., (2008) Sistema de Navegação Semi-Autônomo de Assistência ao Condutor (SAC), UNICAMP.
- [11] DARPA, “*Urban Challenge Technical Evaluation Criteria*”. DARPA Urban Challenge Documentation. Arlington, VA. March, 2007. (http://www.darpa.mil/grandchallenge/docs/Technical_Evaluation_Criteria_031607.pdf).
- [12] ATREYA, A.; CATTLE, B.; COLLINS,B. (2007), “DARPA Urban Challenge - Princeton University - Technical Paper”, Princeton University.
- [13] URMSON,C.; ANHALT, J.; BAGNELL,D., (2008), “Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge”, Journal of Field Robotics 25(8), 425–466 (2008).
- [14] 5th Meeting of the U.S. Software System Safety Working Group, April 12th-14th 2005, California USA.

[15] Página da Internet da empresa Siemens, (http://w1.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_fall_2005/aut_electronics/driver_assistance.htm), acessado pela última vez em 27 de outubro de 2009.

[16] MERTZ,C.; DUGGINS,D; KOZAR,J.; (2005), “Collision Warning and Sensor Data Processing in Urban Areas”, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.

[17] TAKAHASHI, J; YOKOYAMA, A.; KURUGAKY, S.; (2009), “Forward Collision Avoidance Assistance System”, Patent Nr US 2009/0143951 A1-JUN/2009, Patent Application Publication, USA.

[18] BRAEUCHLE,G.; BOECKER, J; (2007), “Lane-change assistant for motor vehicles”, Patent n° US 7,233,848 B2, Jun.19,2007, United States Patent.

[19] ROJAS,R.; (2005) “Pattern Recognition for Autonomous Driving”, Equipe Spirit of Berlin, Freie Universität Berlin.

[20] NAVARRO-SERMENT, L; MERTZ, C; VANDAPEL, N; (2007),“LADAR-based Pedestrian Detection and Tracking”

[21] THRUN, S.; WOLFRAM, B.; DITER, F; (2006), “Probabilistic Robotics”, MIT Press Books.

[22] XIANG, Z., LIU,J., GU, W; (2001), “Obstacle Detection By ALV Using Two 2D Laser Range Finders”, In: ISSN 1009-3095 Journal of Zhejiang University.

[23] LUDEMAN, L.C; (2003), “Random Processes, Filtering, Estimation and Detection”, Wiley, New Jersey.

[24] CHENG,H;ZHENG, N; (2007), “Interactive Road Situation Analysis for Driver Assistance and Safety Warning Systems: Framework and Algorithms”, IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems.

[25] MENDES, A; BENTO, L.C.; NUNES, U.; (2004), “Multi-target Detection and Tracking with a Laserscanner”, 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Itália.

[26] Portal de Notícias Terra acessado pela última vez em 07 de novembro de 2009 (<http://noticias.terra.com.br/brasil/interna/0,,OI3195223-EI998,00.html>).

[27] DEVORE, J. L. (1995), Probability and Statistics for Engineering and the Sciences, 4ª Ed.

[28] HABERMANN, D.; GARCIA, C; (2010), “Detecção e Rastreamento de Obstáculos com uso de Sensor Laser 2D”, Congresso Brasileiro de Automática 2010/ artigo aceito para publicação.

[29] HABERMANN, D.; GARCIA, C; (2010), "Obstacle Detection and Tracking using Laser 2D", *Latin American Robotics Symposium (LARS 2010)*/ artigo aceito para publicação.