UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E INFORMÁTICA

“Utilização de Processamento de Imagens em Aplicações da Aerodinâmica”

Samuel Corrêa Bueno

Dissertação apresentada ao Instituto de Física de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ciências “Física Aplicada- opção Física Computacional”.

Orientador: Prof. Dr. Valentin Obac Roda

OK

São Carlos – São Paulo
1998

USP/IFSC/SBI

8-2-001249

Bueno, Samuel Corrêa
Utilização de Processamento de Imagens em Aplicações da Aerodinâmica/ Samuel Corrêa Bueno – São Carlos, 1998.
107 p.
Dissertação (Mestrado – Instituto de Física de São Carlos, 1998).
Orientador: Prof. Dr. Valentin Obac Roda
1. Visão Computacional. 2. Aerodinâmica. 3. Estol Dinâmico
I. Título

**IFSC UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

Instituto de Física de São Carlos
E-mail: wladerez@if.sc.usp.br

Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
CEP 13560-250 - São Carlos - SP
Brasil

Fone (016) 273-9333

Fax (016) 272-2218

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
SAMUEL CORRÊA BUENO APRESENTADA AO INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO
CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 16 DE OUTUBRO DE 1998.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Valentin Obar Roda/IFSC-USP

Prof. Dr. Alberto Tannús/IFSC-USP

Prof. Dr. Fernando Martini Catalano/EESC-USP

Dedico este trabalho ao “Grande Gaivota”
criador do céu e das aves

(...)

- Um desenhista de aviões de brinquedo? Sr. Towns, um avião de brinquedo é uma dessas máquinas de mola a que se dá corda e coloca-se no chão. Kaycraft faz modelos em escala que voam, coisa completamente diferente.

- Towns acenou abatido:

- Sim, eu não queria ...

- Quanto a ser capaz de construir um avião de tamanho natural, Sr. Towns, creio que deve levar em conta duas coisas muito importantes. Exatamente os mesmos princípios de aerodinâmica se aplicam tanto em aviões em escala quanto aos de tamanho natural – coeficientes de sustentação e arrasto, equações de peso e empuxo, toda a configuração de construção dos mais pesados do que o ar. – As delgadas mãos estavam dobradas direitinho – Aviões em escala estavam voando com êxito mais de cinquenta anos antes dos irmãos Wright deixarem o solo. Não eram aviões de brinquedo, Sr. Towns (...)

O vôo da Fênix; Ellestor Trevor: Biblioteca de Seleções 1965

Agradecimentos:

Ao Professor Valentin pela extrema confiança em mim depositada, pelas ajudas inestimáveis não apenas neste trabalho mas também na vida particular.

Aos professores Fernando Catalano e Campanha também envolvidos no desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pelo patrocínio monetário ao trabalho.

Aos Amigos de Casa: Carlos Alberto, Lázaro Jr., Marcos, Marcos Vinícius, Dona Alzenir e Rosa.

Às garotas: Viviane, Eduarda, Ednalva, Dione, Cristina, a minha irmã Sara.

Ao mecânico Walter por tomar as peças, mesmo sem entender muito o que sairia no final.

Ao pessoal do LIE sem exceção: Benê, Lirio, Ivanilda, Marquinho e Ailton. Ao Max pelas ajudas nos inúmeros problemas. À Wladerez da seção de pós-graduação por seus atendimentos sempre simpáticos e competentes.

Ao colega de Túnel de Vento José Antônio Garcia Croce, que sem sua compreensão e amizade não seriam possíveis as medidas finais.

Ao pessoal do Polo Computacional de Rio Claro, que na reta final me ajudou muito: Walter, Paulo, Cesar Braga, Fábio, Rejane, João, Ari, Tony, Sueli, Sidney, Leandro, Lazinho, Maria Helena, Clotilde e Alexandra.

À Marcia C. Bueno pela ajuda com a bibliografia.

Às lojas de modelismo de São Carlos e Rio Claro, todas elas, ajudaram em muitos detalhes, principalmente a "Nova Mania" onde aprendi a diferença entre flap e aileron e tudo começou e a loja Big Planes que forneceu o material de emergência. Às lojas de material de Informática: Impress Rio Claro; Star Hot Ribeirão Preto; Dakota Rio Claro por fornecerem respectivamente Micro, camera e placa de aquisição de imagem de forma facilitada.

Aos músicos e amigos que conheci durante e em função do trabalho: Nuno Mindelis, Aguinaldo Rocca e André Abujanra, Roger Rocha Moreira, Kika Seixas, Tom Castelli e Gonzallo Piazza.

Ao Ricardo Cavallari por me colocar no caminho sem volta da aviação experimental e a todo o pessoal da Skydive, ao Decio Corrêa pelo papo de Hangar e pelas correções de rotas, ao Marcelo Camargo pelo chute inicial e ao Sr. Farias e Tio Dinho (meus Gurus aeronáuticos) pelas historias de aviação.

Ao meu pai pela ajuda na construção e desenho das peças (Também à Raquel) e à minha mãe pelas caronas para São Carlos.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO I - NOMENCLATURA BÁSICA APLICADA AO ESTUDO DE AERONAVES:.....	3
1.1. OS ELEMENTOS DE UMA AERONAVE BÁSICA:.....	3
1.1.1. <i>Asas</i>	3
1.2. FUSELAGEM:.....	4
1.3. EMPENAGEM:.....	5
1.3.1. <i>Superfície horizontal</i>	5
1.3.2. <i>Superfície vertical</i>	5
1.4. AERONAVES NÃO CONVENCIONAIS.....	6
1.4.1. <i>Aeronaves da asa rotativa</i>	8
1.5. MAIS DETALHES SOBRE A ASA.....	11
1.5.1. <i>Geometria de um perfil aerodinâmico</i>	12
1.5.2. <i>As forças aerodinâmicas</i>	13
1.5.4. <i>Influência do ângulo de ataque sobre o C_l e C_D</i>	16
1.5.5. <i>Influência da geometria sobre C_l</i>	18
1.6. CONSEQUÊNCIAS DO ESTOL.....	19
1.7. MOVIMENTOS DE UMA AERONAVE:.....	19
1.8. OS HELICÓPTEROS E A ORIGEM DO ESTOL DINÂMICO.....	21
1.8.1. <i>O Problema do Rotor Rígido</i>	21
1.8.3. <i>O Estol dinâmico</i>	23
2.1. INTRODUÇÃO.....	25
2.2. AQUISIÇÃO DAS IMAGENS.....	25
2.3. DIGITALIZAÇÃO DA IMAGEM.....	27
2.3.1. <i>Ditherização</i>	28
2.3.2. <i>Mudança de luminosidade</i>	29
2.3.3. <i>Máscara</i>	29
2.3.4. <i>Confecção de histogramas</i>	30
2.3.5. <i>Detecção de bordas</i>	33
2.3.6. <i>Detecção de movimentos</i>	35
2.4. CÂMERAS E PLACAS DE DIGITALIZAÇÃO.....	36
2.4.1. <i>A CÂMERA QUICKCAM</i>	38
2.4.2. <i>PLACA DE CAPTURA DA CIRRUS LOGIC</i>	39
2.5. O RELACIONAMENTO DO VISUAL BASIC 3.0/4.0 COM MULTIMÍDIA.....	41
CAPÍTULO III - AJUSTES DE FUNÇÃO UTILIZANDO REDES NEURAIS	46
3.1. INTRODUÇÃO.....	46
3.2. O ALGORITMO DE BACKPROPAGATION.....	46
3.2.1. <i>A solução do Problema TC, utilizando Backpropagation</i>	52
3.2.2. <i>Transformação do algoritmo em programa Visual Basic 3.0</i>	54
3.2.3. <i>Acomodação de funções $\mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}$</i>	60
CAPÍTULO IV - "HARDWARE" DE APOIO	61
4.1. - EQUIPAMENTO MECÂNICO.....	61
4.2. TÚNEL DE VENTO - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	64
4.3. COMPORTAMENTO DO "TUFT" SOB UMA SUPERFÍCIE AERODINÂMICA.....	67
CAP. V - DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO E DADOS OBTIDOS.....	69
5.1. MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	69
5.1.1. <i>Colocação dos pés e da asa</i>	69
5.1.2. <i>Conexões elétricas e ajuste da câmera</i>	71
5.1.3. <i>Movimento do sistema</i>	72

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

5.2. CALIBRAÇÃO DOS ÂNGULOS..... 73

5.3. IMAGENS UTILIZANDO VENTO 76

 5.3.1. Sem movimento no ângulo de ataque..... 76

 5.3.2. Variando o ângulo de ataque..... 78

5.4. VERIFICAÇÃO DA HISTERESE..... 80

 5.5. Observação de um “tuft” isolado. 82

5.6. APLICAÇÃO DO TIPO $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ 87

BIBLIOGRAFIA 94

APÊNDICE A - FUNÇÕES EM VISUAL BASIC 98

APÊNDICE B - DESENHO DAS PEÇAS MECÂNICAS 107

Índice de Figuras:

Fig.1.Elementos de uma aeronave básica	3
Fig. 2. O perfil de uma asa, criado para fornecer força de sustentação	4
Fig.3. 14-Bis de Santos Dumond. Exemplo de aeronave não convencional	6
Fig.4. Long EZ. Outra aeronave de características não convencionais	7
Fig.5. Modelo experimental alemão da Segunda Guerra - não dispunha de cauda	7
Fig.6-A. Bombardeiro XB-35 de 1946	8
Fig.6-B. Bombardeiro americano B2 - Asa voadora	8
Fig. 7. Movimento da superfície aerodinâmica em torno de um eixo.	8
Fig. 8. Movimentos de um Rotor de Helicóptero	9
Fig. 9-A. O Contra-Rotor	9
Fig. 9-B. O Rotor de cauda	10
Fig. 9-C. O Jato de Ar da Turbina: NOTAR	10
Fig. 9-D. Os Rotores em Tandem	10
Fig. 9-A. Primeiros Auto Giros. Década de 20	10
Fig. 9-B. Auto Giro Moderno	10
Fig. 9-C. Auto Giro Planador	10
Fig.10. Partes componentes de uma asa	11
Fig. 11. Perfil simétrico.	13
Fig.12. Perfil assimétrico	13
Fig. 13. Distribuição de pressões em um perfil aerodinâmico	14
Fig. 14-A. Camada limite laminar	16
Fig. 14-B. Camada limite turbulenta	16
Fig. 15. Efeito do ângulo de ataque sobre a camada limite.	17
Fig. 16. gráfico de $Cl \times \alpha$.	17
Fig. 17.-A – Efeito da variação do Camber	18
Fig. 17-B – Efeito da variação da espessura	18
Fig. 18. Movimentos de uma aeronave ao redor dos três eixos	20
Fig. 19. Diferença das velocidades nas pás que avançam e das que recuam	22
Fig. 20. Efeito da articulação de batimento	23
Fig. 21. Sistema simplificado de aquisição e apresentação de imagens	26
Fig. 22. Captura de um quadro de 13 linhas formado por dois Frames	26
Fig. 23. Exemplo de um sinal de vídeo	27
Fig. 24. Exemplo simplificado de digitalização da imagem	28
Fig. 25-A. Imagem normal.	29
Fig. 25-B. Imagem ditherizada.	29
Fig. 26-A. Imagem original.	29
Fig. 26-B. Imagem melhorada	29
Fig. 27. Emprego típico da máscara de imagem	30
Fig. 28.Fotografia em 256 níveis de cinza e 283 x 201 pixels	30
Fig. 29. Foto da estação orbital MIR no espaço	31
Fig. 30. Linha branca fazendo um ângulo com a horizontal	32
Fig. 31. Histograma radial	33
Fig. 32. Variação dos níveis de cinza em função da distância	34
Fig. 33. Maneiras de aplicar o Gradiente	34
Fig. 34-A. Dois quadros sucessivos(...)	35
Fig. 34-B - Imagem resultante da subtração pixel a pixel das duas imagens anteriores.	36
Fig. 35. Diagrama de tempo de um sinal de vídeo	37
Fig. 36. Estrutura de um arquivo .AVI	42
Fig. 37. Controles para multimídia em um FORM	44
Fig. 38. Frame capturado por um controle de Multimídia e colocado em um PictureBox	45
Fig. 39. Um neurônio artificial	46
Fig. 40. Sentido de Propagação do sinal	47
Fig. 41. Sentido de Propagação do erro	48
Fig. 42. Descida pelo gradiente mais íngreme	50

Fig. 43. Matrizes representando a letra T em várias posições.	53
Fig. 44. Matrizes representando a letra C em várias posições.	53
Fig. 45. Disposição dos neurônios e axiomas da rede proposta.	54
Fig. 46. Form do Programa em Visual Basic.	55
Fig. 47. Pontos a serem ajustados.	60
Fig. 48. Evolução do erro.	60
Fig. 49. Esquema do primeiro protótipo apresentado.	61
Fig. 50. Protótipo final.	63
Fig. 51. Túneis do tipo aberto ou fechado.	65
Fig. 52. Mostrando colocação dos pés.	70
Fig. 53. Mostrando colocação da asa antes da colocação da tampa do túnel.	71
Fig. 54. Conexões elétricas e ajuste da camera	72
Fig. 55. Três posições do aerofólio sendo acompanhado pela camera	73
Fig. 56. Variação da imagem em função do ângulo	74
Fig. 57. Elementos que podem servir de referência para observação do ângulo	75
Fig. 58. Sombra da camera como elemento de visualização	75
Fig. 59. Imagem com vento e ângulo de ataque fixo.	77
Fig. 60. Imagem obtida da mesma maneira que a fig.58.	79
Fig. 61. Gráfico da Histerese no Estol Dinâmico	81
Fig. 62. Gráfico de delta(n) por n	83
Fig. 63. Pontos selecionados a partir do vetor delta	84
Fig. 64. Curva ajustada pela rede neural.	84
Fig. 65. Eixo x legendado com ângulo de ataque	85
Fig. 66. A variação angular do último "tuft" é praticamente nula	85
Fig. 67. Representação das máximas variações a uma distância fixa da corda.	86
Fig. 68. Curvas de nível da fig. 66.	86
Fig. 69. Posições e ângulos dos "tufts".	87
Fig. 70. Variação máxima dos tufts para ângulos de ataque próximos de zero.	88
Fig. 71. Máximas variações angulares dos "tufts" para ângulos de ataque alto.	89
Fig. 72. Curvas de nível da função para ângulos de ataque baixos .	89
Fig. 73. Curva de nível para altos ângulos.	89
Fig. 74. Curva de nível para um ângulo de ataque de -1°	90

RESUMO

Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento e a realização de um experimento utilizando recursos modernos de processamento de imagens como cameras CCD, placas de aquisição de imagens e linguagem de programação visual com interface multimídia para observação do fenômeno do Estol dinâmico que tem grande importância do estudo de estabilidade de aeronaves.

O fenômeno de Estol ocorre nos aerofólios de aeronaves como nos rotores de helicópteros e asas de aeronaves acrobáticas. Nosso sistema é capaz de detectar dentro de um experimento de um aerofólio oscilando em baixas frequências a Histerese de sustentação que ocorre neste.

Utilizamos também na nossa abordagem redes neurais backpropagation para acomodação dos dados experimentais. Implementamos e descrevemos um hardware mecânico para obtenção de melhores imagens e as funções escritas em Visual Basic que foram utilizadas, com o objetivo de permitir a reprodução do experimento em outros centros de pesquisa.

ABSTRACT

In this work we present an experiment using modern imaging processing techniques such as CCD cameras, video acquisition boards and visual programming using multimedia interfacing for the observation of the Stall phenomena which has great importance in the airplane stability.

The Stall phenomena occurs in airplane (airfoils) such as in helicopter blades and acrobatic airplane wings. We demonstrated that the developed system is able to detect the lift hysteresis in a low frequency oscillating bidimensional airfoil.

We also used in our approach backpropagation neural network for the experimental data accommodation. In order to allow replication of the experiment by other institutions, we present a detailed description of the mechanical setup used to obtain the best possible images and of the Visual Basic functions.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Introdução

Objetivos:

O objetivo principal deste trabalho foi a utilização do processamento digital de imagens no desenvolvimento de um experimento com aplicações no estudo de aeronaves. Esta área está se tornando cada vez mais popular e necessita, portanto, de instrumentação adequada a experimentos avançados.

Foi escolhido para nossa aplicação um experimento de túnel de vento [Pope66] que pudesse ser realizado de maneira visual, para podermos utilizar a captura e o processamento digital, e que apresentasse variação no tempo.

Depois da análise de vários experimentos, decidimos estudar o fenômeno do *Estol* dinâmico [Seddon 90] [Romeny94]. Este experimento tem sido realizado por vários pesquisadores utilizando diversas abordagens, principalmente utilizando sensores de pressão [Tang95] [Aso95].

Metodologia

Quanto ao método de processamento da imagem, utilizamos operadores populares [Gonzales93] e para reconhecimento de padrões optamos por utilizar redes neurais do tipo Error Backpropagation .

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Foram necessárias algumas peças mecânicas, que foram construídas de forma artesanal fornecendo-se os dados no Apêndice B são apresentados os desenhos mecânicos destas peças para que possam ser reproduzidas por outros grupos de pesquisa interessados.

Os algoritmos foram implementados em Visual Basic 3.0. A escolha se fez em função da sua simplicidade em trabalhar de modo interativo. As funções implementadas são apresentadas no apêndice A.

Este trabalho passa por áreas distintas, de maneira a obter um resultado final que possa ser compreendido facilmente para qualquer “não-iniciado” em qualquer das áreas.

Procuramos agrupar as áreas por Capítulos, a saber:

- Capítulo I - Termos relacionados ao estudo de aeronaves e descrição histórica do fenômeno que foi pesquisado: O *Estol* dinâmico.
- Capítulo II - O Processamento digital de Imagens. Pequeno histórico, aplicações utilizada em nosso trabalho. Características de Câmeras e placas de aquisição. Relacionamento de uma linguagem comercial de alto-nível, em particular o Visual Basic, com multimídia e imagens.
- Capítulo III - Redes Neurais, Algoritmo Backpropagation, suas características e problemas.
- Capítulo IV - “*hardware*” de Apoio. Suporte ao sistema asa/câmera. Breve descrição do túnel de vento utilizado.
- Capítulo V - Descrição do experimento e resultados.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

CAPÍTULO I - Nomenclatura básica aplicada ao estudo de aeronaves:

1.1. Os elementos de uma aeronave básica[Souza91]:

Mostramos na figura 1 as partes componentes de um avião comum.^(*)

Fig.1 - Elementos de uma aeronave básica

1.1.Asas.

São os elementos encarregados de criarem a força de sustentação necessária ao voo. A sustentação é a força que equilibra o peso de toda a aeronave.

(*)

Prefere-se o termo comum ao convencional, uma vez que o segundo englobaria propulsão, trem de pouso e outras características convencionais. O trem de pouso convencional por exemplo não se aplica a aeronave ilustrada.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

A força de sustentação acontece em função da diminuição da pressão do ar na superfície superior da asa em comparação à superfície inferior. Isto é conseguido dando a asa, um perfil apropriado, como o mostrado na figura 2.

Figura 2: O perfil de uma asa, criado para fornecer força de sustentação

Este fenômeno será analisado mais adiante.

1.2. Fuselagem:

São fundamentais à estrutura da aeronave. É onde fica fixada a asa, onde se aloja a tripulação e em alguns casos o motor, trem de pouso, etc..

Geralmente não geram sustentação suficiente ao voo de uma aeronave. Porém a sustentação e o arrasto criados por uma fuselagem em voo é motivo de estudos detalhados no desenvolvimento de uma aeronave.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

1.3. Empenagem:

Localizada geralmente na parte traseira da aeronave, é encarregada de estabilizar o avião de forma que não saia de sua trajetória. A empenagem é formada por componentes que aumentam ou diminuem a sustentação, de acordo com a necessidade, como veremos a seguir.

1.3.1. Superfície horizontal.

Constituída na maioria dos casos por estabilizador horizontal e profundor tem por função estabilizar o movimento de subida e descida do nariz do avião. Este movimento é chamado de *arfagem*. Estes elementos podem também ser atuados de forma a aumentar a sustentação ou diminuir fazendo o avião subir ou descer.

1.3.2. Superfície vertical.

Constituída pelo estabilizador vertical e leme de direção, estabilizam a aeronave à tendência de desviar para esquerda ou direita. Assim como, quando atuados de maneira correta, podem criar mais sustentação para a direita ou esquerda, fazendo a aeronave virar para uma destas direções.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

1.4. Aeronaves não convencionais [Bowers84].

Algumas características básicas de uma aeronave podem variar. Isto se deve às inúmeras tentativas de se resolverem problemas das características das aeronaves convencionais. Muitas destas tiveram sucesso com suas características muitas vezes exóticas, outras ficaram apenas nos testes iniciais. Abaixo mostramos alguns desses exemplos

Empenagem a frente da aeronave. É o caso do famoso 14-bis de Santos Dummond mostrado na figura 3.

Figura 3. 14-Bis de Santos Dumond. Exemplo de aeronave não convencional

Superfícies Horizontais a frente da aeronave e verticais nas pontas das asas, mostrado na figura 4.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Figura 4. Long EZ. Outra aeronave de características não convencionais

Aeronaves sem cauda (*Tailless*) também é uma característica explorada, tem por finalidade reduzir peso e arrasto da cauda. Faz-se necessário que a aeronave tenha um movimento de *arfagem* estável, podendo dispensar a cauda portanto (figura 5).

Fig.5 - Modelo experimental alemão da Segunda Guerra - não dispunha de cauda

Asas voadoras. Uma forma radical de *Tailless* em que todos os componentes da aeronave são alojados do interior da asa, dispensando além da empenagem, também a fuselagem, dois exemplos são mostrados na figura 6-A e 6-B.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Figura 4. Long EZ. Outra aeronave de características não convencionais

Aeronaves sem cauda (*Tailless*) também é uma característica explorada, tem por finalidade reduzir peso e arrasto da cauda. Faz-se necessário que a aeronave tenha um movimento de *arfagem* estável, podendo dispensar a cauda portanto (figura 5).

Fig.5 - Modelo experimental alemão da Segunda Guerra - não dispunha de cauda

Asas voadoras. Uma forma radical de *Tailless* em que todos os componentes da aeronave são alojados do interior da asa, dispensando além da empenagem, também a fuselagem, dois exemplos são mostrados na figura 6-A e 6-B.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

O movimento de rotação das pás é acionado por um motor. Além disso as pás possuem movimento em seu próprio eixo, acionado pelo piloto diretamente ou por sistema hidráulico.

Figura 8. Movimentos de um Rotor de Helicóptero

Devido ao grande momento de rotação do movimento das pás, a fuselagem do helicóptero sofre um torque no sentido contrário da rotação das pás. Este torque é neutralizado de várias maneiras, escolhida para cada caso, ilustrados na figura 9:

Fig. 9-A. O Contra-Rotor

Fig. 9-B. O Rotor de cauda

Fig 9-C. O Jato de Ar da Turbina: NOTAR

Fig.9-D. Os Rotores em Tandem

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Além do helicóptero existe também o autogiro. Surgido na década de 20, consiste em um motor que traciona a aeronave, enquanto uma asa giratória semelhante a de um helicóptero gira. Esta não está conectada ao grupo motriz e seu giro inicial é feito de forma manual, ou durante o movimento da aeronave pela pista (taxi) com o vento gerado. Estas aeronaves são muito populares ainda hoje, como aeronaves recreativas dado seu baixo custo de aquisição (em geral abaixo de US\$ 15.000,00 o kit para montagem amadora[Downie97]) e operacional, uso de motores simples (alguns utilizam motores automobilísticos adaptados, ou os aeronáuticos Lycoming, Continental ou Rotax). Existiram também aeronaves planadoras. Na figura 9 vemos algumas configurações deste tipo de aeronave.

Fig. 9-A. Primeiros Auto Giros. Década de 20

Fig 9-B. Auto Giro Moderno

Fig. 9-C. Auto Giro Planador

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Em resumo: Apesar de possuírem características que o façam diferir muito uns dos outros as aeronaves seguem o mesmo princípio básico para sustentação.

1.5. Mais detalhes sobre a asa [Kermode42] [Seddon 90].

A seguir mostramos as partes componentes de um perfil aerodinâmico:

Fig.10 - Partes componentes de um perfil aerodinâmico

- a) Bordo de Ataque: É a parte frontal da asa que investe contra o fluxo de ar.
- b) Bordo de Fuga: É a parte traseira da asa.
- c) Ponta da asa: É a parte da asa que fica mais distante da fuselagem.
- d) Raiz da asa: É a região de união da asa com a fuselagem.
- e) Envergadura: É a distância medida entre as pontas da asa. Corresponde ao comprimento desta e é representado pela letra "b"
- f) Semi-envergadura "b" : É a medida entre a raiz e a correspondente ponta da asa.
- g) Perfil ou seção transversal da asa: Corresponde a um corte transversal ao comprimento da asa. Este perfil varia de acordo com aeronave e sua aplicação. Existe

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

uma nomenclatura para cada tipo de perfil, por exemplo NACA 0012, Clark Y, etc. [Souza91].

h) Corda da asa: Corresponde a distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga.

i) Ângulo de incidência. É o ângulo formado pela linha da corda de uma seção da asa e o eixo longitudinal do avião.

j) Extradorso e Intradorso: Respectivamente parte superior e inferior da asa.

l) Enflexamento: É ângulo formado entre o eixo transversal do avião e o bordo de ataque da asa.

1.5.1. Geometria de um perfil aerodinâmico [Souza91].

Além do bordo de ataque e fuga, extradorso e intradorso e corda já vistos, temos ainda:

a) Linha de curvatura média: É uma linha que vai da extremidade do Bordo de ataque a extremidade do Bordo de fuga, e que em todos os pontos tem a mesma distância entre o extradorso e o intradorso.

b) Ângulo de ataque α : É o ângulo formado entre a corda do perfil e a direção do vento relativo.

Quanto a sua forma o perfil pode ser classificado em dois grandes grupos:

a) Perfil simétrico: É aquele em que o extradorso e o intradorso são iguais, ou ainda é aquela que a curvatura média se confunde com a corda do perfil.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig. 11 - Perfil simétrico.

b) Perfil assimétrico: Ao contrário do outro, não apresenta simetria em relação a corda, então intradorso e extradorso são diferentes.

Fig.12 - Perfil assimétrico

c) A maior distância entre a corda e a linha média é chamada de Camber.

1.5.2 As forças aerodinâmicas

Suponhamos um perfil assimétrico colocado em um escoamento uniforme com ângulo de ataque nulo. Observamos que no extradorso o ar tem que percorrer um caminho maior que no intradorso [Souza91].

Considerando que o ar é incompressível e que o fluxo de ar deve permanecer constante ao redor do perfil decorre que a velocidade do ar no intradorso é maior que no extradorso. A partir da equação de Bernoulli [Sears85] temos a relação entre esta variação da velocidade e a variação de pressão na superfície, ou seja a pressão estática

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

no extradorso é menor que no intradorso[Souza91]. Na figura 13 mostramos a distribuição de pressões neste caso.

Fig. 13 - Distribuição de pressões em um perfil aerodinâmico

Podemos encontrar uma resultante das forças que atuam sobre o perfil. O ponto de aplicação desta força é chamado centro de pressão (CP) e podemos ver na fig.13 que esta resultante aponta para cima e para trás. Para facilitar o estudo, decompomos esta resultante em dois eixos, um paralelo à corda da asa e outro perpendicular a esta. À componente paralela à corda chamamos Arrasto (Drag) e à componente perpendicular chamamos Sustentação (Lift). Pode-se encontrar a força de sustentação L pela expressão:

$$L = C_l \rho / 2 v^2 S$$

onde,

ρ : densidade do ar

v : é a velocidade do vento relativo

S : é a área da asa

C_l : Coeficiente de sustentação depende de uma serie de características do aerofólio, como veremos à frente

Da mesma maneira, o arrasto (D) será :

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

$$D = C_D \rho / 2 v^2 S$$

com,

ρ : densidade do ar

v : é a velocidade do vento relativo

S : é a área da asa

C_D : Coeficiente de arrasto, também depende de uma serie de características do aerofólio.

Em cada tipo de aeronave, e para cada tipo de manobra (decolagem, aterrissagem, vôo nivelado, etc.), estas duas grandezas são dosadas de acordo com a necessidade. Por exemplo na decolagem é útil uma máxima sustentação, porém o arrasto deve ser menor que na aterrissagem pois este ajuda a reduzir a velocidade com que a aeronave toca o solo.

O arrasto D é composto por arrasto de pressão mais os arrasto de atrito e induzido depende da viscosidade do fluido e da rugosidade da superfície do corpo imerso em fluido, em virtude destes existe um finíssimo filme de fluido que adere à superfície do aerofólio, a velocidade neste ponto é zero, e vai aumentando até se tornar constante igual à do fluxo livre. Esta camada é chamada **camada limite**. Nesta camada há velocidades relativas entre as sub-camadas e conseqüente atrito entre as partículas. Esta perda de energia é transmitida ao aerofólio provocando esta outra forma de arrasto.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Se considerarmos ainda que uma pequena placa é imersa no fluido, a camada limite é suficientemente fina, e a perda de energia é pequena, a distribuição das velocidades é constante, chamamos a esta **camada limite laminar**.

Por outro lado, se imergirmos uma placa muito grande, a perda de energia poderá ser suficiente para provocar uma distribuição irregular das velocidades, o que aumentaria ainda mais o arrasto de atrito em um ciclo. Nesta região ocorre um escoamento turbulento.

Fig. 14-A: Camada limite laminar

Fig. 14-B. Camada limite turbulenta

1.5.4. Influência do ângulo de ataque sobre o C_l e C_D

Observando a sequência da figura 15, podemos verificar que na segunda figura, o ar passa no extradorso por um caminho muito maior que na primeira. Desta forma podemos intuir que a diferença de pressões é maior também. Da mesma forma na terceira imagem a força de sustentação é ainda mais intensificada.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig. 15: Efeito do ângulo de ataque sobre a camada limite. Da esquerda para a direita e de cima para baixo, aumento gradativo do ângulo de ataque e a consequente formação de uma camada limite turbulenta.

Se continuarmos a aumentar o ângulo de ataque porém, atingiremos um ponto em que a parte final da camada limite começa a se desprender, por não possuir energia suficiente, por assim dizer, para acompanhar a curva da asa neste ângulo. Nesta área formar-se-á uma região de escoamento turbulento, provocando uma região de baixa pressão que aumentará o arrasto de pressão.

Além desse ponto se continuarmos a aumentar o ângulo de ataque, a sustentação passará a diminuir e não aumentar como vinha acontecendo.

Dizemos então que a asa sob estas condições está **ESTOLADA**. E a este fenômeno chamamos **ESTOL**.

Na figura 16 apresentamos um gráfico de $C_l \times \alpha$.

Fig.16 - gráfico de $C_l \times \alpha$.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Para um dado ângulo de ataque, podemos ainda diminuir a velocidade do vento relativo, desta forma poderemos ter também uma situação de *Estol*, pois o ar não conseguirá acompanhar o perfil da asa.

Esta análise fizemos para o perfil assimétrico. No caso do perfil simétrico, o mesmo ocorre, porém no caso de um ângulo de ataque nulo, o caminho que o ar fará no extradorso será o mesmo que no intradorso. Não haverá neste caso sustentação[Souza91].

No perfil assimétrico existe um ângulo crítico onde isso acontece, a este chamamos ângulo de sustentação nula, que é em geral menor que zero.

O Perfil simétrico também é preferido para o uso em aeronaves acrobáticas .

1.5.5. Influência da geometria sobre C_l .

Além das já citadas na seção 1.5.4., influem também na sustentação as seguintes características:

- a) Arqueamento (Camber)
- b) Espessura.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

1.6. Conseqüências do Estol.

O *Estol* sob certos limites pode não representar risco ao vôo da aeronave. Porém a diminuição da força de sustentação pode atingir tal ponto em que esta será menor que a força peso da aeronave. Isto poderá fazer que a aeronave venha a colidir com o solo. Além disso o *Estol* pode ocorrer somente em uma das asas, fazendo com que a aeronave entre em parafuso. É importante portanto à formação do futuro piloto saber reagir às características de uma aeronave em *Estol*, além de saber prever com segurança a eminência deste ocorrer.

A aeronave por sua vez deve ser projetada e construída de forma a ter características próximas ao *Estol* chamadas mansas, de forma que não se exija muito treinamento de adaptação, tornando dessa forma o vôo mais seguro.

1.7. Movimentos de uma aeronave:

Uma aeronave pode realizar movimentos em torno de três eixos que passam pelo centro de gravidade da mesma, estes movimentos recebem os seguintes nomes [Souza91]:

Cabrar ou Arfar : Quando o avião levanta o nariz; e

Picar : Quando a aeronave baixa o nariz

Rolamento para a esquerda: Quando a asa direita se levanta e a esquerda se abaixa.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Rolamento para a direita : Quando a asa esquerda se levanta e a direita se abaixa.

Guinada para a direita : Quando o nariz se volta para o lado da asa direita:

Guinada para a esquerda : Quando o nariz se volta para o lado da asa esquerda

Concluimos assim uma ligeira explanação sobre os termos utilizados no estudo de aeronaves. Existem muitos outros, porém, neste caso não citados pois não interessam diretamente neste trabalho.

1.8. Os Helicópteros e a origem do estudo do Estol Dinâmico [Manke197]

[Bowers84]

1.8.1. O Problema do Rotor Rígido.

Historicamente, vemos que os primeiros aparelhos “mais pesados que o ar” a tentarem alçar vôo eram construídos inspirados nos pássaros. O estudo das aeronaves com asas rotativas não eram portanto muito intuitivas. Afirma-se que as primeiras intuições sobre o assunto foram observações sobre certos tipos de sementes. Da Vinci apresentou algumas ilustrações sobre o assunto[Angelucci75].

Porém nas primeiras décadas do século (1910-1920) com os sucessos das primeiras aeronaves voadoras, inicia-se também as tentativas de decolagem e vôo com aeronaves de asa rotativa. O conceito é simples: Girar a asa ao invés de fazê-la correr.

Ao contrário do que se esperava, entretanto, os primeiros testes foram decepcionantes [Angelucci75]. Algumas aeronaves nesta configuração erguem-se ao céu e permanecem exatamente acima do ponto de decolagem. À menor tentativa de avançar, ou um simples vento, fazia com que a aeronave precipitasse ao chão[Bower84].

Se analisarmos um rotor girando com seu ângulo de ataque fixo, sem vento relativo no sentido de deslocamento das pás, podemos afirmar que a sustentação ao longo da pá será o mesmo em todo o giro do rotor. A velocidade relativa do vento será a mesma para um dado comprimento da raiz.

No caso, porém de acrescentarmos um deslocamento das pás, gerando um vento relativo V (ou um vento incidindo por exemplo do nariz para a cauda) teremos

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Este problema foi resolvido por Juan de La Cierva em 1928 [Bowers84] [Angelucci75] acrescentando ao rotor uma articulação de batimento que atua de forma a diminuir o ângulo de ataque da pá que avança contra o vento e aumentar o da que recua fazendo com que a primeira suba e a segunda desça.

Este controle de movimento é aerodinâmico e independe dos comandos do piloto. Isso fez com que os autogiros pudessem a ser pilotados mais docilmente.

1.8.3. O Estol dinâmico:

Vimos no item 1.5.4., que o Estol ocorre quando o ângulo é elevado acima de um ângulo crítico. A partir deste ângulo, apesar de se aumentar o ângulo α a sustentação diminuirá.

Com o surgimento dos helicópteros e deste movimento de aumento/diminuição do ângulo de ataque (α) um fenômeno passou a despertar o interesse de estudos. O

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Estol não inicia e termina no mesmo ângulo, existindo portanto um ângulo crítico para aumento e outro para diminuição [Seddon90] .

Isto ocorre tanto em aeronaves de asa fixa quanto em aeronaves de asas rotativas. No caso das aeronaves de asas rotativas, como vimos, a variação de α ocorre periodicamente, ao contrário da aeronave de asas fixas que tem seu ângulo de ataque modificado em função dos controles do piloto.

Neste trabalho submetemos um perfil aerodinâmico a oscilações para verificarmos o fenômeno do Estol Dinâmico. Este estudo tem especial interesse no estudo de aeronaves de asas rotativas.

Capítulo II - O Processamento digital de imagens

2.1 Introdução

O Processamento de Imagens surgiu inicialmente como forma de aperfeiçoar imagens jornalísticas transmitidas por cabos submarinos entre Londres e Nova York, durante a década de 20[Gonzales93].

O Processamento Digital, apareceu muito mais tarde para tratar as imagens que eram geradas pelas câmeras instaladas na nave espacial Ranger-7 enviada a Lua, durante os preparativos para as missões APOLLO. De lá para cá muitas aplicações se desenvolveram, utilizando computadores de grande Porte, Micro Computadores [Kittler85] ou circuitos dedicados [Luppe97] de forma que hoje utiliza-se em imagens de utilidade médicas ,militares ou publicitárias.

2.2.Aquisição das Imagens

O Processo de aquisição de imagens segue, em geral, o mesmo conceito para o Sistema Digital ou Analógico [Galbiati90] . Uma câmera, seja ela de varredura de feixe de elétrons, ou laser ou ainda de CCD, gera um sinal que possa posteriormente através de um sistema especial qualquer, representar a imagem originalmente capturada. No caso de uma câmera de vídeo, o processo ocorre da seguinte forma:

Fig.21: Sistema simplificado de aquisição e apresentação de imagens

A captura de uma imagem é feita da direita para a esquerda e de cima para baixo. Por motivos ergonômicos (ligados principalmente ao fenômeno de ofuscamento da imagem) a captura de um quadro completo é feito em duas etapas chamadas frames par e ímpar, como mostrado na figura 22:

Fig.22 Captura de um quadro de 13 linhas formado por dois campos.

A partir da aquisição da imagem é gerado um sinal, conhecido por sinal de vídeo, que além de conter o sinal da varredura da imagem, possui também informações a respeito da própria imagem, tais como, mudança de linha, mudança de quadro.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

A parte do sinal que representa a imagem possui uma modulação em amplitude proporcional a iluminação da imagem naquela dada posição.

Fig.23 Exemplo de um sinal de vídeo

2.3.Digitalização da Imagem

Uma imagem para poder ser processada por um sistema digital deve ser transformada em dados digitais. Em geral são utilizados conversores A/D de alta velocidade para transformarem o sinal de vídeo em uma sequência de informações digitais, estas são por sua vez, proporcionais à amplitude do sinal. Para facilitar os cálculos sobre a imagem, as informações são armazenadas em uma matriz em que cada elemento recebe o nome de Picture Element, ou Pixel.

Fig. 24 Exemplo simplificado de digitalização da imagem

Note que o aumento do número de elementos (pixels) usados para montar a matriz determinam o quanto a imagem terá de qualidade. No exemplo da figura 24 o número de pixels é tão pequeno que seria impossível reconstruir a figura com qualidade. A representação da resolução da imagem é feita na forma *colunas x linhas x n.º de níveis de cinza ou cores*.

Sobre esta matriz de dados, podemos executar os processos que julgarmos úteis, a seguir mostramos uma série de processamentos [Levine85] utilizados neste trabalho:

2.3.1. Ditherização:

Realçar da imagem os *pixels* cujo valor exceda um certo valor. Este processamento é utilizado geralmente para diminuir ruídos. Em comparação aos

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

circuitos analógicos a ditherização seria semelhante ao filtro passa-alta associado a um indicador de nível.

Fig. 25-A - Imagem normal

*Fig. 25-B - Imagem ditherizada
As estrelas de menor "magnitude"
não aparecem na imagem final*

2.3.2. Mudança de luminosidade:

Multiplicação por um fator. Multiplica-se todos os elementos da matriz por um fator constante, obtendo desta maneira uma melhor relação luz total/escuro total.

Fig. 26-A: Imagem original

Fig. 26-B: Imagem melhorada

2.3.3. Máscara:

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Usado para ocultar parte da imagem que não interessam ao processamento ou à visualização. Cada elemento $I(x,y)$ da matriz da imagem passará pela seguinte transformação:

$$I(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{se } x,y \notin \text{região não aproveitada} \\ I(x,y) & \text{se } x,y \in \text{região a ser processada ou reconstruída} \end{cases}$$

Fig. 27 Emprego típico da máscara de imagem

2.3.4. Confecção de histogramas

Representação do número de pixels / nível de pixel.

Para uma imagem com x,y elementos com níveis $I(x,y)$ variando de 0 a n seguimos o seguinte algoritmo para alimentar a matriz $R(l)$ com $l=0$ até n .

circuitos analógicos a ditherização seria semelhante ao filtro passa-alta associado a um indicador de nível.

Fig. 25-A - Imagem normal

*Fig. 25-B - Imagem ditherizada
As estrelas de menor "magnitude"
não aparecem na imagem
final*

2.3.2. Mudança de luminosidade:

Multiplicação por um fator. Multiplica-se todos os elementos da matriz por um fator constante, obtendo desta maneira uma melhor relação luz total/escuro total.

Fig. 26-A: Imagem original

Fig. 26-B: Imagem melhorada

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.29 Foto da estação orbital MIR no espaço

Histograma da figura ao lado

Além disso podemos também fazer um histograma apenas em uma área de interesse, ou ainda de uma linha que nos interesse.

Uma variação do sistema de histograma utilizado em nosso trabalho, constitui em, através dos picos de concentração de intensidade encontrar um objeto de interesse.

Tomemos como exemplo o problema de descobrir a direção de uma linha branca em uma imagem, a partir de um ponto dado desta linha, conforme mostra a figura 30.

Fig.30 - Linha branca fazendo um ângulo com a horizontal

Se a partir do ponto dado (na figura a interseção das linhas vermelhas) traçarmos uma circunferência de raio r e plotarmos o histograma do nível de intensidade/ângulo teremos algo do tipo.

1. $x = 0$
2. $y = 0$
3. Se $x \neq x_{\max}$ então
 4. Se $y \neq y_{\max}$ então
 5. $R(I(x,y)) = R(I(x,y)) + 1$
 6. $y = y + 1$
 7. Volte a 4
 8. $x = x + 1$
9. Volte a 3

Através da análise do histograma é possível analisar se uma figura está escura ou clara por exemplo.

Figura 28: Fotografia em 256 níveis de cinza e 283 x 201 pixels

Histograma dos pixels/
níveis de cinza

Analisando o exemplo da figura 28 podemos afirmar que a imagem está bastante clara uma vez que a maior concentração de pontos ocorrem na região referente aos pixels brancos. Já no exemplo da figura 29 os pontos escuros excedem em muito a soma de todos os pontos iluminados.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.29 Foto da estação orbital MIR no espaço

Histograma da figura ao lado

Além disso podemos também fazer um histograma apenas em uma área de interesse, ou ainda de uma linha que nos interesse.

Uma variação do sistema de histograma utilizado em nosso trabalho, constitui em, através dos picos de concentração de intensidade encontrar um objeto de interesse.

Tomemos como exemplo o problema de descobrir a direção de uma linha branca em uma imagem, a partir de um ponto dado desta linha, conforme mostra a figura 30.

Fig.30 - Linha branca fazendo um ângulo com a horizontal

Se a partir do ponto dado (na figura a interseção das linhas vermelhas) traçarmos uma circunferência de raio r e plotarmos o histograma do nível de intensidade/ângulo teremos algo do tipo.

Fig.31 - Histograma radial

Podemos afirmar neste caso que o ângulo θ representa o sentido apontado pela linha.

2.3.5. Detecção de bordas

Definiremos borda, para uma imagem monocromática como sendo a descontinuidade ou mudança abrupta nos níveis de cinza de uma imagem.

Dependendo da qualidade da imagem, podemos ter esta mudança de intensidade, mais ou menos abrupta. Num caso ideal, teríamos uma mudança de níveis em uma variação de espaço muito pequena. Porém em modelos reais a variação ocorre num espaço muito maior.

Fig. 34B - Imagem resultante da subtração pixel a pixel das duas imagens anteriores. A fraca linha branca indica a corda em movimento

2.4. Câmeras e Placas de Digitalização

Em geral as câmeras mais utilizadas atualmente, seja para uso domestico ou comercial, são as de sensor de estado sólido, conhecidas por CCD.

Estas câmeras possuem a grande vantagem de possuir dimensões e pesos muito inferiores as câmeras de feixe de varredura e as Laser.

Comercialmente, as câmeras para uso domestico e uso em laboratório, possuem resolução de Televisão (700x525) com uma taxa de 30 quadros/seg.

Isto significa que a cada segundo são capturados 30 quadros, ou seja 30 campos impares e 30 campos pares, utilizando como referencia o sinal padrão de 60 Hz.

Uma aproximação para o Gradiente utilizando as diagonais pode ser representado por:

$$\nabla f \approx \sqrt{(I_{(i,j)} - I_{(i+1,j+1)})^2 + (I_{(i,j+1)} - I_{(i+1,j)})^2}$$

Uma variação deste gradiente é conhecida como cruz de Roberts e tem a forma:

$$\nabla f \approx \max \{ | I_{(i,j)} - I_{(i+1,j+1)} |, | I_{(i,j+1)} - I_{(i+1,j)} | \}$$

2.3.6. Detecção de movimentos

Obtêm-se uma nova matriz de imagens I_r que será obtida da subtração da imagem I_{t_0} e $I_{t_0+\delta t}$, em uma dada coordenada x,y será:

$$I_r(x,y) = | I_{t_0}(x,y) - I_{t_0+\delta t}(x,y) |$$

Fig.34A - Dois quadros sucessivos mostrando uma secção do corpo de uma guitarra, em cuja uma das cordas está se movendo.

Utilizamos em parte deste trabalho uma câmera QUICKCAM, que é uma câmera destinada principalmente a aplicações de vídeo conferência.

2.4.1. A CÂMERA QUICKCAM

A câmera QUICKCAM é uma câmera de vídeo conferência, que é conectada diretamente a porta paralela de um microcomputador. Existem modelos monocromáticos e coloridas. O modelo monocromático, que utilizamos, possui uma taxa de aquisição de até 30 quadros/s configurável por “*software*”. Seu preço não supera os US\$ 100.

O “*software*” para controle e captura de vídeo é muito simples e ocupa muito pouco espaço em disco.

O “*hardware*” é também muito simples. Sua conexão à porta paralela é semelhante a conexão de uma impressora. O circuito de alimentação fica em paralelo com o teclado, portanto o consumo de energia é pequeno.

Durante as operações com esta câmera, observamos apenas um problema em seu “*software*”. Caso o “*software*” de captura seja acionado com a câmera desligada, o arquivo .INI do “*software*” é alterado assinalando o erro. Mesmo que a câmera seja ligada e o micro reinicializado o “*software*” continua reportando a ausência da câmera. É necessário neste caso a reconfiguração do manual arquivo .INI .

O foco desta câmera é constante, porém fizemos uma alteração na fixação da lente que ajudou no ajuste fino da focalização de algumas imagens. Nota.: Este procedimento não é recomendado pelo fabricante pois diminui a vida útil da câmera.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Os tamanhos da imagem são: 80 x 60; 160 x 120; 320 x 340 com 16 ou 64 níveis de cinza.

As perdas de frames são:

Tamanho	Frames perdidos c/ 16 níveis de cinza	Frames perdidos c/ 64 níveis de cinza
80 x 60	36%	42%
160 x 120	66%	67%
320 x 340	89%	92%

Nota. O “*software*” de captura desta câmera não permite fixar o tempo de aquisição. Portanto o sinal de parada foi acionado manualmente.

2.4.2. PLACA DE CAPTURA DA CIRRUS LOGIC

Utilizamos também uma placa de captura da Cirrus Logic, modelo CL-GD5465, que possui 4 Mbytes de VRAM, saída SVGA, conexão PCI, entrada de Vídeo Composto (NTSC, PAL M/N/B, configurável por “*software*”) e entrada SVHS. Possui sintonizador interno de Televisão sendo necessária apenas a conexão externa de uma antena e caixas de som, caso não possua uma placa de som já instalada. As imagens são coloridas.

A maior taxa de captura também é 30 frames/s. Porém de acordo com o tamanho da imagem de captura alguns frames são perdidos. A quantidade de frames perdidos em uma aquisição fixada em 10 segundos a 30 frames/s e 8 bits de cores, em um micro Cyrix 586 100 Mhz e 32 Mb de RAM, com monitor de 800 x 600 x 16 bits de cores foi:

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Tamanho da Imagem	Frames perdidos	Frames totais
80x60	37	305
160x120	123	300
320x240	240	308
640x480	305	329

Esta placa também é de simples instalação e operação, feitas as seguintes ressalvas:

- Em micros da Linha IBM (Como os Aptivas), existe uma interrupção de sincronismo vertical, que o “*software*” da placa utiliza e que no micro testado não estava liberada por “*hardware*”. Isso impede o uso da captura nestes micros, a menos que se faça o ajuste adequado.
- A escolha da taxa de atualização do monitor (quando usando a saída SVGA da placa) é escolhida de duas maneiras: Automática e Manual. No modo automático por vezes a tela apresentou “*flickering*” excessivo enquanto no modo Manual é possível ajustar uma taxa não suportada pelo monitor. Neste caso, a volta só é possível reconfigurando a placa, o que despende muito tempo.

O “*software*” desta placa exige um espaço pequeno em disco (Cerca de 600 Kbytes) e é distribuído em CD e disquete.

Existem porém equipamentos especializados à medidas muito rápidas, a seguir mostramos as características de um destes [NAC95]:

modelo HSV-500 da industria NAC

- Velocidade de armazenamento: 200 ou 500 figuras por segundo
- Formato de gravação: Super VHS ou VHS
- Tempo de gravação: 43 minutos (dependendo da fita utilizada).
- Formato de saída : Y/C , NTSC ou PAL
- Resolução: 350 linhas a mais que o sistema de TV
- Utiliza uma estação de trabalho VTR para processar os dados.

2.5.O Relacionamento do Visual Basic 3.0/4.0 com Multimídia

No início deste trabalho o Visual Basic 3.0 estava se impondo como a linguagem visual mais popular. Surgiu posteriormente o Visual Basic 4.0. adequada a 32 bits, porém muito semelhante a versão 3.0 e posteriormente a versão 5.0 que se distanciou muito da versão 3.0.

O Arquivo . AVI é padrão criado pela MICROSOFT [Microsoft93b] para armazenar imagens sincronizadas com canais de áudio e texto. Estes arquivos não possuem compactação (Como os MPEG) e as informações sobre o arquivo são armazenados em um Header, descrito a seguir:

Total Frames (por exemplo, 1500 frames neste AVI)
Streams (por exemplo, 2 para audio e vídeo juntos)
InitialFrames
MaxBytes
BufferSize
Microseconds Per Frame
Frames Per Second (for example, 15 fps)
Size (por exemplo 320x240 pixels)
Flags

Arquivo da Microsoft mostrando o Header do arquivo .AVI

A estrutura dos dados neste arquivo, para uma imagem de $m \times n$ elementos, fica distribuída da seguinte maneira:

Podemos utilizar uma abertura sequencial de um arquivo AVI e a partir das informações do Header montar a imagem ponto a ponto, conforme o algoritmo:

1. Abrir o arquivo.AVI em modo sequencial de leitura
2. Ler informações do Header.

3. Posicionar na primeira informação de Imagem
4. Contar x de 0 à última coluna
 - 4.1. Contar y de 0 à ultima linha
 - 4.1.1. Ler registro do arquivo Intensidade I
 - 4.1.2. Plotar em (x,y) o ponto com intensidade I
 - 4.2. Voltar a 4.1.
5. Voltar à 4

Podemos repetir o processo (a partir de 3) para lermos os outros frames e desta maneira ler todo o arquivo. Fizemos muitas leituras desta maneira. Porém o processo de montagem da imagem associada a leitura do arquivo é muito lento.

O Visual Basic, porém apresenta um conjunto de ferramentas destinadas exclusivamente à manipulação de Multimídia [Microsoft93b][Badgett94]. Para incorporar estas ferramentas, procedemos da seguinte maneira:

Com um projeto em branco aberto, acionamos a opção *ADD FILE* em *FILE* a seguir escolhemos o arquivo *MCI.VBX* que se encontra no diretório *WINDOWS/SYSTEM*. No Visual Basic 4.0, o processo é semelhante, acrescentamos o *MCI32.OCX* através da opção *Tool Custom Control*.

O Visual Basic adicionará o seguinte botão a barra de ferramentas:

Este botão implementa um objeto do tipo *MMControl* (Multi-Media Control).

Em um FORM este objeto aparece na forma de controles de multi-mídia, como:

Fig. 37 Controles para multimídia em um FORM

Através das propriedades *FileName* deste objeto, podemos fixar (em tempo de execução ou de projeto) o arquivo que queremos controlar, e através dos botões mostrados na figura 36 controlar o avanço, retrocesso, apresentação do Arquivo.

Além disso o VB apresenta o recurso de se passar comandos ao Objeto multimídia, através da propriedade *COMMAND* (Disponível apenas durante a execução), com isso é possível, por exemplo apresentar um quadro ao fim de um contador.

É confortável também passar a imagem multimídia para um objeto *PictureBox* para facilitar a manipulação da imagem. Isso é feito passando o *Handler* do *PictureBox* para o *Handler* de saída da *MMControl*. Isso é feito por uma expressão do tipo:

MMControl.hWndDisplay = form.Picture.hWnd

Se além disso, modificarmos a escala do *Picture Box* para *ScaleHeight = Linhas da Imagem* e *ScaleWidth = Colunas da Imagem*, teremos então uma Matriz na própria tela, contendo o quadro da imagem. Cada Pixel pode ser associado à um elemento da imagem, através da função *Point(x,y)* que retorna o código RGB do Pixel na x-ésima coluna e da y-ésima linha. Além disso funções do tipo *PSET*, *LINE* e *CIRCLE* podem manipular a matriz de forma bastante imediata.

Fig.38 - Frame capturado por um controle de Multimídia e colocado em um PictureBox.
As linhas de referência (Vermelhas) são plotadas usando o comando LINE

Devido porém ao fato da Linguagem Visual Basic ser interpretada e não compilada, alguns processos levam muito tempo para serem executados. Em alguns casos pode-se utilizar rotinas feitas em linguagem C [Microsoft93b] e anexadas no Projeto VB através de uma importação da função.

Capítulo III - Ajustes de função utilizando redes neurais

3.1. Introdução

A escolha de um algoritmo de acomodação de funções de dados experimentais por redes neurais ao invés de métodos convencionais como séries de Fourier ou MacLaurin, para posterior interpolação das mesmas se deve principalmente ao fato de se poder acomodar funções não comportadas. Também usamos a oportunidade para mostrar a transformação de um algoritmo matemático em programa em linguagem comercial de alto nível orientada ao objeto, como o Visual Basic.

A necessidade de se utilizar uma rede neural tipo perceptron multicamadas, e não realimentada, recaiu sobre o modelo "Error Backpropagation".

3.2. O algoritmo de Backpropagation [Freeman92].

O elemento básico de uma rede artificial é o neurônio artificial, mostrado a seguir:

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Se além disso, modificarmos a escala do *Picture Box* para $ScaleHeight = Linhas da Imagem$ e $ScaleWidth = Colunas da Imagem$, teremos então uma Matriz na própria tela, contendo o quadro da imagem. Cada Pixel pode ser associado a um elemento da imagem, através da função $Point(x,y)$ que retorna o código RGB do Pixel na x-ésima coluna e da y-ésima linha. Além disso funções do tipo PSET, LINE e CIRCLE podem manipular a matriz de forma bastante imediata.

Fig.38 - Frame capturado por um controle de Multimidia e colocado em um PictureBox. As linhas de referência (Vermelhas) são plotadas usando o comando LINE

Devido porém ao fato da Linguagem Visual Basic ser interpretada e não compilada, alguns processos levam muito tempo para serem executados. Em alguns casos pode-se utilizar rotinas feitas em linguagem C [Microsoft93b] e anexadas no Projeto VB através de uma importação da função.

Capítulo III - Ajustes de função utilizando redes neurais

3.1. Introdução

A escolha de um algoritmo de acomodação de funções de dados experimentais por redes neurais ao invés de métodos convencionais como séries de Fourier ou MacLaurin, para posterior interpolação das mesmas se deve principalmente ao fato de se poder acomodar funções não comportadas. Também usamos a oportunidade para mostrar a transformação de um algoritmo matemático em programa em linguagem comercial de alto nível orientada ao objeto, como o Visual Basic.

A necessidade de se utilizar uma rede neural tipo perceptron multicamadas, e não realimentada, recaiu sobre o modelo "Error Backpropagation".

3.2. O algoritmo de Backpropagation [Freeman92].

O elemento básico de uma rede artificial é o neurônio artificial, mostrado a seguir:

onde i varia de acordo com a dimensão de D^μ , S^μ . O problema agora é como a partir de uma dada entrada E e um conjunto w obtemos S . Ora, sabemos que o neurônio faz a soma dos valores recebidos pelos axiomas (de pesos W) e a este aplica a função de ativação G . Neste caso, a camada escondida terá como saída:

$$V_j^\mu = G \left(\sum_{k=1}^N W_{jk} E_k^\mu \right), \quad \boxed{2}$$

onde j depende do número de neurônios na camada escondida e N do números de componentes de E^μ , da mesma maneira a saída, que receberá os valores dos neurônios da camada escondida, terá como saída:

$$S_j^\mu = G \left(\sum_{i=1}^M w_{ij} G(V_i^\mu) \right) = G \left(\sum_{j=1}^M w_{ij} G \left(\sum_{k=1}^N W_{jk} E_k^\mu \right) \right) \quad \boxed{3}$$

Esta é portanto a saída obtida do conjunto de entrada E e dos pesos w .

Observa-se que sendo G uma função não linear, a saída também o é.

Substituindo este valor na equação do erro (1), obtemos:

$$E(w) = 1/2 \sum_{\mu} \sum_i [D_i^\mu - \left(\sum_{j=1}^M w_{ij} G \left(\sum_{k=1}^N W_{jk} E_k^\mu \right) \right)]^2$$

A forma utilizada pelo algoritmo de backpropagation minimizar a função de erro é conhecida como descida pelo gradiente mais íngreme. Este método consiste em se partindo de um ponto inicial w_i chegar a um ponto w_m que minimiza o erro. Isto é

pesos, de forma a recalculá-los. Com os novos pesos, colocamos novamente valores de entrada cujo valor de saída se conheçam, devemos obter então um valor que se diferencie em um δ menor que o da situação inicial. Note que o erro é propagado no sentido contrário, daí o nome “*Error Backpropagation*” ou simplesmente “*Backpropagation*”.

Este processo de fornecer dados com pares de entrada e saídas ou padrões corretos é chamado de **treinamento supervisionado**.

Seja um conjunto de P pares $\{E^\mu, D^\mu\}$, com $1 \leq \mu \leq P$, onde cada vetor D^μ representa o que é desejado como saída da rede quando submetido a uma entrada E^μ .

Porém para uma dada combinação de pesos w , obteremos uma saída S^μ . Definamos então um erro como:

$$E(w) = 1/2 \sum_{\mu} \sum_i [D_i^\mu - S_i^\mu]^2 \quad \boxed{1}$$

$$\Delta w_{ij} = -\alpha \sum_{\mu} (D_i^{\mu} - S_i^{\mu}) \frac{d}{dW_{ij}} (D_i^{\mu} - S_i^{\mu}) = \alpha \sum_{\mu} (D_i^{\mu} - S_i^{\mu}) \frac{d}{dW_{ij}} (S_i^{\mu}) = \alpha$$

$$\sum_{\mu} (D_i^{\mu} - S_i^{\mu}) \frac{d}{dW_{ij}} G(h_i^{\mu})$$

$$= \alpha \sum_{\mu} (D_i^{\mu} - S_i^{\mu}) G'(h_i^{\mu}) \frac{d}{dW_{ij}} \sum_j W_{ij} V_j^{\mu}$$

$$= \alpha \sum_{\mu} (D_i^{\mu} - S_i^{\mu}) G'(h_i^{\mu}) V_j^{\mu}$$

Definindo

$\delta_i^{\mu} = G'(h_i^{\mu}) (D_i^{\mu} - S_i^{\mu})$, poderemos rescrever ΔW_{ij} como :

$$\Delta W_{ij} = \alpha \sum_{\mu} \delta_i^{\mu} V_j^{\mu}$$

De forma análoga, obteremos para os pesos que ligam a camada escondida à

Entrada:

$$\Delta w_{jk} = \alpha \sum_{\mu} \delta_j^{\mu} E_k^{\mu}$$

com

$$\delta_j^{\mu} = G'(h_j^{\mu}) \sum_i W_{ij} \delta_i^{\mu}$$

Podemos generalizar, que a variação dos pesos para uma rede qualquer será:

$$\Delta w_{ij} = \alpha \sum_{\mu} \delta_{saída} \times V_{entrada} \text{ onde saída e entrada referem-se aos extremos da sinapse}$$

em questão V.

Analisando estas equações podemos ver que podemos calcular os valores de δ em termos dos valores de δ da camada posterior. Este é o processo que faz com que o erro seja propagado no sentido da saída para a entrada do sinal como já dissemos esse é o motivo do nome *retropropagação* ou *backpropagation*.

Podemos ainda, calcular iterativamente os melhores valores dos pesos W para minimizar a função Erro, obtendo assim sistemas bastante confiáveis. Existem duas maneiras de se treinar a rede. Uma delas é atualizar os pesos, passando por todos os exemplos possíveis, este é chamado por **lote**. A outra consiste em atualizar os valores a cada exemplo, este é chamado de **estocástico**. Preferimos utilizar o treino na forma de lote.

3.2.1. A solução do Problema TC, utilizando Backpropagation.

Como teste inicial, partimos da solução do problema TC sugerido por Freeman [Freeman92]

Este problema consiste em se identificar em uma matriz de entrada, quando a esta for colocada valores correspondentes a formação da imagem da letra C ou T independente de sua posição, como mostra a figura 43:

Fig.43 - Matrizes representando a letra T em várias posições. Os valores .9 representam elementos acesos e .1 elementos apagados.

Fig.44 - Matrizes representando a letra C em várias posições.

Desejamos que para qualquer C apresentado, tenhamos como saída o valor .1 e para T tenhamos o valor .9

Para concordância com o artigo, foram utilizados os mesmos nomes de variáveis utilizadas no Mathemática®, porém com um v (vê *underscore*) precedendo. Exemplo: a variável output em nosso programa fica v_output.

Outra alteração foi a escolha da função de ativação G, uma vez que o Visual Basic 3.0 não possui a função sigmoide, utilizamos a função tanh (tangente hiperbólica) que teve de ser implementada e de comportamento bastante conhecido e semelhante a função sigmoide.

$\Delta w_{ij} = \alpha \sum_{\mu} \delta_{saída} \times V_{entrada}$ onde saída e entrada referem-se aos extremos da sinapse

em questão V.

Analisando estas equações podemos ver que podemos calcular os valores de δ em termos dos valores de δ da camada posterior. Este é o processo que faz com que o erro seja propagado no sentido da saída para a entrada do sinal como já dissemos esse é o motivo do nome *retropropagação* ou *backpropagation*.

Podemos ainda, calcular iterativamente os melhores valores dos pesos W para minimizar a função Erro, obtendo assim sistemas bastante confiáveis. Existem duas maneiras de se treinar a rede. Uma delas é atualizar os pesos, passando por todos os exemplos possíveis, este é chamado por **lote**. A outra consiste em atualizar os valores a cada exemplo, este é chamado de **estocástico**. Preferimos utilizar o treino na forma de lote.

3.2.1. A solução do Problema TC, utilizando Backpropagation.

Como teste inicial, partimos da solução do problema TC sugerido por Freeman [Freeman92]

Este problema consiste em se identificar em uma matriz de entrada, quando a esta for colocada valores correspondentes a formação da imagem da letra C ou T independente de sua posição, como mostra a figura 43:

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.46 - Form do Programa em Visual Basic

O Procedimento de ensino é feito da seguinte maneira:

1. Carrega-se os valores de entrada (v_{inputs}), e os valores de saída ($v_{outDesired}$) de apenas um exemplo, por exemplo letra C a 90° , isto é feito com o auxilio de um contador (f) que varre todos os exemplos fornecidos, isto é feito pelas linhas,

```
For f = 1 To 8
  If f = 1 Then v_inputs(1) = .9
  If f = 1 Then v_inputs(2) = .9
  If f = 1 Then v_inputs(3) = .9
  If f = 1 Then v_inputs(4) = .9
  If f = 1 Then v_inputs(5) = .1
  If f = 1 Then v_inputs(6) = .1
  If f = 1 Then v_inputs(7) = .9
  If f = 1 Then v_inputs(8) = .9
  If f = 1 Then v_inputs(9) = .9
  If f = 1 Then v_outDesired = .1
  Rem
  If f = 2 Then v_inputs(1) = .9
  If f = 2 Then v_inputs(2) = .9
  If f = 2 Then v_inputs(3) = .9
  If f = 2 Then v_inputs(4) = .1
  If f = 2 Then v_inputs(5) = .9
  If f = 2 Then v_inputs(6) = .1
  If f = 2 Then v_inputs(7) = .1
  If f = 2 Then v_inputs(8) = .9
  If f = 2 Then v_inputs(9) = .1
  If f = 2 Then v_outDesired = .9
  Rem
  If f = 3 Then v_inputs(1) = .9
```

2. Caso não esteja calculado ainda valores para os pesos, então atribui-se valores aleatórios. Uma variável auxiliar chamada *PASSOU* é utilizada para este fim. Quando o programa é inicializado, seu valor é “n” (representando que não passou ainda pela rotina de inicialização dos pesos). Usando a função RND que gera um número pseudo-aleatórios entre 0 e 1, subtraímos então 0,5 para obtermos valores entre -0,5 e 0.5. A variável *PASSOU* passa a ter então valor “s”. Nesta etapa também é atribuído o valor do coeficiente de aprendizado (*v_eta*).


```
If passou = "n" Then
  For i = 1 To 3
    For j = 1 To 9
      v_hidWts(i, j) = (Rnd - .5)
    Next j
  Next i
  For i = 1 To 3
    v_outWts(i) = (Rnd - .5)
  Next i
  v_eta = .5
  passou = "s"
End If
```

3. Nesta etapa, então passamos a calcular os valores de saída, utilizando as equações 2 e 3

$$V^{\mu}_j = G \left(\sum_{k=1}^N W_{jk} E^{\mu}_k \right), \quad \boxed{2}$$

$$S^{\mu}_j = G \left(\sum_{j=1}^M w_{ij} G \left(\sum_{k=1}^N W_{jk} E^{\mu}_k \right) \right) \quad \boxed{3}$$

Nesta etapa também calculamos a diferença entre o valor obtido efetivamente (v_outputs) e o valor esperado (v_outDesired)

```
For i = 1 To 3
    v_hidOut(i) = 0
    For j = 1 To 9
        v_hidOut(i) = v_hidOut(i) + v_hidWts(i, j) * v_inputs(j)
    Next j
    v_hidOut(i) = tanh(v_hidOut(i))
Next i
v_outputs = 0
For i = 1 To 3
    v_outputs = v_outputs + v_outWts(i) * v_hidOut(i)
Next i
v_outputs = tanh(v_outputs)
text2.Text = v_outputs
v_outErrors = v_outDesired - v_outputs
```

4. Podemos agora calcular os valores para os deltas, sabendo que sendo $G(u)$ é $\tanh(u)$ a função $G'(u)$ será $\text{sech}^2(u)$, representado no programa por sech2 .

```
v_outErrors = v_outDesired - v_outputs
Rem
v_outDelta = v_eta * (sech2(v_outputs)) * v_outErrors
For i = 1 To 3
    v_hidDelta(i) = v_eta * (sech2(v_hidOut(i)) * (v_outWts(i)) * v_outDelta)
Next i
```

5. Daí para frente podemos atualizar cada valor dos pesos, e voltar ao ponto 1. Note o uso da variável g , que controla o número de “ensinamentos” limitado por um FOR no início (no caso a 100 vezes). Aconselhamos que ao invés disso seja usado um termo de parada baseado no erro obtido. Note que este trecho é praticamente repetição do item 3, o que sugere seu uso em forma de Procedure, não feita aqui para maior clareza.

As aplicações são inúmeras, tanto no reconhecimento de caracteres como no ajuste de função.

3.2.3. Acomodação de funções $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$:

3.2.3.1.funções sem ruído:

Supondo que desejamos encontrar uma função que apresenta os seguintes valores discretos:

Fig.47 - Pontos a serem ajustados

Para uma rede Backpropagation composta por um elemento de entrada, cinco elementos escondidos e um elemento de saída e $\alpha = 0.5$ Em função do número de interações, obteremos a seguinte evolução de erro:

Fig.48 - Evolução do erro

Capítulo IV - “hardware” de Apoio

Dentro de nossa proposta de criar um experimento com aplicações no estudo de aeronaves utilizando o processamento digital de imagens, descrevemos a partir deste capítulo os procedimentos utilizados em nosso trabalho .

4.1. - Equipamento mecânico.

Devido as características do experimento proposto viu-se a necessidade de se desenvolver um suporte especial para a câmera de forma a criar uma conexão mecânica entre a asa e a câmera de forma que a segunda ficasse sempre um plano acima da primeira.

O Primeiro protótipo apresentado no 3º simpósio Interno da Pós-Graduação do IFSC [Bueno96] está esquematizado na figura 49:

Fig.49 - Esquema do primeiro protótipo apresentado

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

A proposta era desenvolver um equipamento que possuísse rigidez estrutural de forma que pudesse, ao oscilar, não induzir outras oscilações indesejáveis [Kermode42]. A primeira construção de um pequeno protótipo foi feita em material acrílico transparente. Este material possui um preço relativamente alto quando se usa chapas grossas (maiores que 40 mm). E também algumas peças metálicas não se ajustavam corretamente sem retirar parte do material acrílico.

Um segundo protótipo foi construído de tubos de PVC usado em instalação hidráulica residencial. Este material é de fácil aquisição e dentro de certos comprimentos é razoavelmente rígido. Pode-se aumentar a rigidez em alguns casos colocando espuma de poliuretano e epoxi, ou madeira torneada, no interior do tubo. Além disso estes tubos possuem dimensões tabeladas e várias opções de conexão como cotovelo, cruzeta além de possuírem redutores que podem conectar tubos maiores aos menores.

Na figura 49 temos um esquema detalhado deste protótipo. As buchas foram feitas de latão em torno caseiro e os rolamentos aproveitados de automóveis (Novos porém, não aproveitados de sucata). O eixo que prende a asa foi feito em aço doce.

Um comentário deve ser feito a respeito deste eixo. Devido as características do material foram constantes as oxidações e no caso de um aperto mais forte do parafuso 1, 2 ou 3 e 4, ocorreram deformações permanentes no material, que por vezes não movimentava corretamente para ajustes. No caso de uma construção de um protótipo futuro poder-se-ia utilizar materiais mais resistentes.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Os pés foram feitos de aço utilizado em montagens de grades residenciais. Estas também apresentaram constantes oxidações, porém uma fina camada de tinta eliminou o problema.

Fig.50 - Protótipo final

Na fase de dimensionar este suporte contávamos com a possibilidade de utilizar pequenas câmeras de vídeo “camcorder” comerciais. Porém com o andamento do trabalho observamos que as câmeras que utilizávamos eram bem menores e muito mais leves do que se esperava.

Além disso o número de peças a serem ajustadas provocava erros. Como exemplo citamos uma pequena inclinação na mesa. Isto fazia com que a parte que apoia a câmera ficasse levemente inclinada e com isso prejudicava o movimento do sistema. Outro problema que ocorria com frequência era a necessidade de se movimentar a câmera ligeiramente (cerca de 1,5 cm) para frente, perpendicularmente ao braço. Neste modelo isto requeria nova montagem do apoio da câmera.

Como solução passamos a utilizar apenas metade do sistema. Neste caso o apoio e movimento ficaram mais livres e também os ajustes foram reduzidos.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

O uso do contrapeso foi de extrema importância e responsável por evitar inúmeros acidentes.

As medidas (Cap.V) foram feitas de maneira manual simulando a atuação do piloto sobre as superfícies de controle. Utilizamos em certas fases do trabalho um motor elétrico simulando o movimento oscilatório do rotor do helicóptero, porém o ajuste da rotação do motor associada ao desenho do sistema de ajuste da câmera tornou perigoso um acidente com a câmera. Além disso algumas vibrações indesejadas eram passadas ao sistema causando problemas graves na formação da imagem. Porém este tipo de medida pode ser uma excelente opção para trabalhos futuros.

A asa foi construída em madeira compensada e pintada de preto fosco, para dar contraste com os "tufts". O Perfil utilizado foi o NACA 00012 ligeiramente modificado.

4.2. Túnel de Vento - Considerações Gerais

Dentre as várias maneiras de se resolver problemas aerodinâmicos, tais como, teste em vôo, teste com luz, túneis de água, o túnel de vento [Pope66] é uma alternativa que apresenta ao mesmo tempo, custo competitivo, segurança e grande precisão de resultados.

Quando as velocidades envolvidas na medida são inferiores à 340 m/s, situação em que pode-se negligenciar os fenômenos de compressibilidade do ar, o túnel é chamado de túnel de baixa velocidade.

Quanto a sua construção os túneis podem ser abertos ou fechados, como mostra a figura 51.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.51 - Túneis do tipo aberto ou fechado

Um importante parâmetro usado nos experimentos em túneis de vento é o *número de Reynolds* que é dado por:

$$R = \frac{\rho}{\mu} V l \quad \text{onde} \quad \rho = \text{densidade do ar}$$

μ = Coeficiente de viscosidade

V = Velocidade do corpo

l = comprimento característico do corpo

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

No caso de um perfil aerodinâmico o valor de l coincide com o comprimento da corda média.

Para que um experimento com modelo em escala possa ser feito com similaridade com um modelo real o número de Reynolds deve ser mantido constante.

Portanto para um modelo na escala 1:2, mantendo-se as características do ar constante, a velocidade deveria ser dobrada do que se espera no modelo real. Deve-se ainda respeitar o limite de 340 m/s para que os efeitos da compressibilidade não comprometam o experimento.

Na fabricação de carros de corrida, são utilizados modelos 1:2 ou no máximo 1:4 com túneis suficientemente grandes para conterem estes modelos em seu interior. Ainda na indústria automobilística existem modelos de túnel de vento que comportam modelos inteiros em seu interior. No caso de aviões muito grandes isso não é possível, obviamente. Então neste caso recorre-se ao uso de escalas ou de testes isolados de cada componente.

Um túnel de vento aberto pode ainda ser dividido nas seguintes partes:

Hélice: Também chamada de “Fan”, é responsável por fazer o ar se movimentar e dar a velocidade desejada ao ar. A Hélice é acionada por um motor elétrico ou a explosão.

Área de trabalho. Local onde é realizado o experimento. Geralmente onde é fixado o modelo a ser testado. O comportamento do ar neste local é determinado pela estrutura e características do túnel.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

“*Honeycomb*”. Estrutura em forma de casas de abelhas vazada, responsável por “domar” o ar de forma a mante-lo estável na área de trabalho.

Entrada de ar. Onde é feita a captação do ar externo. Geralmente é uma região protegida por telas para evitar a ingestão de detritos.

A Hélice fica na saída de ar, exatamente para diminuir ainda mais os efeitos da turbulência.

Junto as paredes do túnel o ar se prende a superfície delas fazendo com que à uma pequena distância das paredes o efeito aerodinâmico seja alterado.

4.3.Comportamento do “*tuft*” sob uma superfície aerodinâmica .

O “*tuft*” é um pedaço de linha colocado em uma superfície aerodinâmica a fim de verificar o comportamento do fluxo de ar que passa por ele.

É necessário que o “*tuft*” seja muito leve e flexível para que os experimentos possam apresentar bons resultados. Em algumas situações o “*tuft*” deve ser pequeno para não criar uma esteira de turbulência atrás de si.

Quando um “*tuft*” está em uma superfície aerodinâmica com uma camada laminar seu comportamento é quase parado, indicando o sentido da corrente de vento. O “*tuft*” se mantém aderente ao perfil.

Quando a camada laminar se desprende da superfície o “*tuft*” se desprende da superfície aerodinâmica apresentando movimento desorientado.

Para nosso trabalho fez-se necessário também que o “*tuft*” apresentasse contraste de cor para que pudesse ser bem registrado pela câmera.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Dentre os materiais testados destacamos:

- Fio de Nylon. Muito flexível e muito leve (Como os usados em cabelos de bonecas), apresentaram alguns problemas na formação da imagem, enquanto os mais grossos não apresentaram flexibilidade suficiente.
- Nylon Trançado. Este material utilizado em cortinas consiste em um conjunto de dezenas de fios muito finos entrelaçados. São vendidos na forma de pequenos “pincéis”. Apresentam flexibilidade muito boa em comparação a seu diâmetro (cerca de 1 mm) e são bastante leves. No entanto são muito grandes e geram muita turbulência atrás de si e são muito difíceis de serem colados adequadamente a superfície.
- Linha de costura comum. Apresenta ótimos resultados, porém não pudemos reutilizar nos experimentos pois o “bordo de fuga” do “*tuft*” apresentava uma deformação do material, desprendendo os fios de sua composição formando uma espécie de leque.
- Linha de costura de seda. Apresenta todas as qualidades da anterior, sendo porém mais resistentes e podendo ser utilizada em mais experimentos.

Recomenda-se para testes do fluxo de ar, uma colocação dos “*tufts*” em linhas de 15%, 30%, 45%, 60% e 75% da corda média como sendo suficiente para observação do comportamento geral da asa [Pope66].

No sentido da semi-envergadura à ponta da asa os “*tufts*” devem ser colocados de maneira a não interferirem no movimento dos seus vizinhos. Portanto a distância lateral de um “*tuft*” a outro deve ser superior ao dobro de seu comprimento.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Apesar de em geral os “*tufts*” serem colados em suas superfícies através de fitas, o uso destas não foi possível pois estas atrapalhavam a visualização do próprio “*tuft*”. Colamos então o “bordo de ataque” do “*tufts*” na própria superfície usando cola branca em quantidade mínima deixando 90% de seu corpo livre para se movimentar.

A primeira tentativa de se utilizar os “*tufts*” sobre a asa, resultou em uma superfície super-carregada de “*tufts*” (cerca de 200). Isto foi útil para a calibração de luz e foco da câmera, mas o excesso de “*tufts*” provocava colisões entre eles o que fazia com que eles ficassem inativos.

Cap. V - Descrição do experimento e dados obtidos

5.1. Montagem do equipamento

A montagem do equipamento não apresenta problemas mais complexos, damos especial atenção a alguns ajustes iniciais:

5.1.1. Colocação dos pés e da asa.

Quando da colocação dos pés procurou-se deixá-los o mais fixo possível na bancada situada na parte inferior do túnel. Não é necessário entretanto que o paralelismo entre os pés fosse rigoroso, desde que o eixo de suporte permanecesse paralelo ao piso do túnel. No túnel montado não tínhamos espaço suficiente para ajustes no conjunto número 2 da figura 53, portanto os parafusos foram deixados do outro lado.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Para a passagem do eixo que prende a asa foi feito um furo nas paredes do túnel de diâmetro igual ao do eixo.

A asa foi colocada fixa neste eixo e presa pelos parafusos 1 e 2 da figura 53. Posteriormente a tampa foi colocada por encaixe. O contrapeso foi colocado ao final antes da instalação da câmera.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.53 Mostrando colocação da asa antes da colocação da tampa do túnel

5.1.2. Conexões elétricas e ajuste da câmera.

Finalmente foram instalados as conexões elétricas. Todos os cabos foram presos por fita adesiva para influenciarem o mínimo possível no movimento.

O cabo n. 1 é de alimentação de 12 volts D.C. para a câmera. Utilizou-se par vermelho-preto para evitar inversão de polaridade. O cabo n.2 é de sinal de vídeo que liga a câmera ao videocassete. Utilizou-se coaxial de 75 Ω e o comprimento foi ajustado "in loco" para minimizar os ruídos. O cabo n. 3 conecta a saída de vídeo do aparelho vídeo cassete ao monitor de vídeo. Para este foi utilizado um cabo comercial fornecido com o próprio aparelho.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.54 Conexões elétricas e ajuste da câmara

Com toda a aparelhagem ligada é possível ajustar a câmara para cima/para baixo para a esquerda/direita afim de se obter uma boa imagem. Todo o sistema fixado foi marcado a tinta para posterior ajuste rápido.

Ao contrário do que se esperava inicialmente não tivemos tempo disponível (Devido a manutenção no prédio do túnel e outros experimentos a serem realizados no mesmo) para desmontagem e remontagem para cada seção de trabalho. Assim montamos o equipamento, tomamos as medidas necessárias para um dia, desmontamos a parte elétrica, retomamos no dia seguinte. Este processo foi repetido durante uma semana. Ao final desta desmontamos todo o equipamento e remontamos em cerca de 3 horas.

5.1.3. Movimento do sistema

Depois de montado o sistema apresenta movimento apenas com a câmara e o aerofólio conectados, de forma que a imagem obtida é sempre do mesmo plano. A

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

sobra da câmera é o único indicativo do movimento. Acrescentamos fitas na parte inferior do túnel para que também servissem de indicativo do movimento.

Fig.55 - Três posições do aerofólio sendo acompanhado pela câmera

5.2. Calibração dos ângulos

Fixando ao eixo da asa um transferidor e utilizando um fio de prumo podemos calibrar a imagem obtida em função do ângulo.

O ângulo tido como 0 (zero) na verdade é uma aproximação, uma vez que nos interessa é a variação angular. Posteriormente corrigiremos este ângulo inicial para o ângulo de ataque real.

Com a câmera ligada fixamos um ângulo, determinado pelo fio de prumo e do transferidor. Obtido o ângulo desejado colocamos uma plaqueta a frente da câmera, onde está escrito o ângulo medido. Deixamos então a imagem sem nenhuma

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.54 Conexões elétricas e ajuste da câmera

Com toda a aparelhagem ligada é possível ajustar a câmera para cima/para baixo para a esquerda/direita afim de se obter uma boa imagem. Todo o sistema fixado foi marcado a tinta para posterior ajuste rápido.

Ao contrário do que se esperava inicialmente não tivemos tempo disponível (Devido a manutenção no prédio do túnel e outros experimentos a serem realizados no mesmo) para desmontagem e remontagem para cada seção de trabalho. Assim montamos o equipamento, tomamos as medidas necessárias para um dia, desmontamos a parte elétrica, retomamos no dia seguinte. Este processo foi repetido durante uma semana. Ao final desta desmontamos todo o equipamento e remontamos em cerca de 3 horas.

5.1.3. Movimento do sistema

Depois de montado o sistema apresenta movimento apenas com a câmera e o aerofólio conectados, de forma que a imagem obtida é sempre do mesmo plano. A sobra da câmera é o único indicativo do movimento. Acrescentamos fitas na parte inferior do túnel para que também servissem de indicativo do movimento.

Fig.55 - Três posições do aerofólio sendo acompanhado pela câmera

5.2. Calibração dos ângulos

Fixando ao eixo da asa um transferidor e utilizando um fio de prumo podemos calibrar a imagem obtida em função do ângulo.

O ângulo tido como 0 (zero) na verdade é uma aproximação, uma vez que nos interessa é a variação angular. Posteriormente corrigiremos este ângulo inicial para o ângulo de ataque real.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Montamos para isto uma rede Backpropagation como descrita no capítulo II, porém com 1 elemento de entrada, 15 elementos escondidos e 1 elemento de saída. Para $\alpha = .1$ conseguimos com 45000 interações um erro de $\pm 0.5^\circ$. No entanto o mesmo valor foi obtido com uma relação linear, utilizando uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados (Utilizamos uma função interna do Excel 5.0).

Uma vez ajustada a reta, pudemos testar a consistência dos resultados apresentando várias imagem previamente gravadas, cujo ângulo conhecíamos, mas diferiam em pequenos detalhes com a imagem original, como iluminação e método de captura.

Uma vez calibrados os ângulos passamos para a segunda etapa. As medidas utilizando vento.

5.3. Imagens utilizando vento

Para nosso estudo dividimos o estudo com vento em 3 etapas:

- Sem movimento no ângulo de ataque
- Com movimento ascendente do ângulo de ataque
- Com movimento descendente do ângulo de ataque

5.3.1. Sem movimento no ângulo de ataque

Esta primeira etapa consistiu em manter a hélice ligada, produzindo um vento constante de aproximadamente 25 m/s. Ajustamos primeiramente o ângulo de ataque de forma que a sustentação fosse uniforme em toda a asa, e com isso os “tufts” ficassem

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig. 57 Elementos que podem servir de referência para observação do ângulo

Optamos por usar a posição da sombra da câmera, por esta apresentar um bom contraste na imagem e por ter uma variação espacial grande.

Fig. 58 - Sombra da câmera como elemento de visualização

Após esta etapa temos como saída dois vetores: Ang (40) e Erro(40). O Primeiro com os ângulos característicos de cada "tuft" parado e a segunda com a máxima variação do primeiro. Em geral $|Erro| \leq 1 \text{ radianos}$.

5.3.2. Variando o ângulo de ataque.

Ainda com a câmera ligada, passamos a variar o angulo de ataque, até um máximo de 3 graus e diminuimos até um mínimo de -2 graus (Previamente garantimos que entre estes ângulos era possível verificar a separação da camada limite).

O Processo de digitalização desta imagem é mais complicado. Um experimento destes leva em torno de 25 a 30 segundos. Portanto um arquivo capturado a frequência de 1 frame/segundo com resolução 320 x 240 x 255 níveis de cinza terá um tamanho de 1.4 Mbytes.

Para uma taxa maior, faz-se necessário que o "hardware" de captura seja adequado. Em um Pentium 100 Mhz ou em um Ciryx de mesmo clock, as perdas de frames capturados podem superar os 50% (Conforme mostrado no capítulo III).

Como alternativa, utilizamos experimentalmente, a captura de cada frame isolado em forma de um arquivo formato .BMP. Isto dispense muito trabalho e exige-se que o vídeo em que se reproduza as imagens tenha boa qualidade para imagem parada. Porém dados muito bons foram conseguidos desta maneira. Este método pode ser uma alternativa confiável no caso de máquinas com desempenho muito pobres, ou

(*) Pode-se treinar uma rede neural Hopfield/Backpropagation para que possa reconhecer estes

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

para demonstrações onde pode-se não ter certeza da presença do arquivo VBX descrito na seção 2.5.

Utilizando o algoritmo de histograma podemos determinar os ângulos característicos para cada frame, assim como utilizando o método descrito em 5.2. descobrir o ângulo de ataque que a figura apresenta.

Fig.60 - Imagem obtida da mesma maneira que a fig.58. Percebe-se pela posição da câmera que o ângulo de ataque é outro, e percebe-se também que os ângulos dos "tufts" estão bastante alterados.

Neste caso somamos os "tufts", que em um determinado ângulo se distanciam mais que | erro | do ângulo inicial. Somamos estes e colocamos em um vetor *Estol* (ângulo, *qtia*). Procedemos esta etapa em duas fases: Primeiramente para as imagens correspondentes aos ângulos de subida, e posteriormente aos ângulos de descida.

Em resumo o algoritmo deste processo é o seguinte:

1. Armazena-se vetor *Ang*(*n*."tuft") e *Erro*("tuft") usando as imagens com sistema parado

pontos dos demais. Em certa altura do trabalho utilizamos este recurso, porém o tempo de

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

2. Zera-se vetor *Estol* (α, q_{tia})

3. Captura-se Frame

3.1. Zera-se vetor *Qtia*(*tuft*)

3.2. Calcula-se ângulo de ataque α através da imagem da sombra da câmera

3.3. Atribui-se $Qtia("tuft") = 1$ para "*tuft*" fora do padrão $Ang("tuft") \pm Erro("tuft")$

3.4. Passa-se para o próximo Frame

3.5. Este Frame pertence ao mesmo ângulo que o anterior $\pm .5^\circ$?

3.5.1. Se sim retorna a 3.3.

3.5.2. Se não

3.5.2.1. *Estol* (α, q_{tia}) = Soma de todos os elementos cujo $Qtia("tuft") = 1$.

3.5.2. Volta para 3.1.

Note que o item 3.3. garante que mesmo que o "*tuft*" por um frame retorne ao seu ponto de equilíbrio ele será computado no frame seguinte, caso esteja realmente em movimento.

5.4. Verificação da Histerese.

Processamos uma imagem capturada no túnel de vento, com a câmera localizada de maneira que fosse registrada a semi-envergadura de nosso aerofólio.

processamento era muito grande para o pobre resultado obtido.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Dois “*tufts*” foram arrancados durante a montagem da asa no túnel, portanto eles tiveram que ser desconsiderados para os cálculos finais.

Depois de todos os aparatos mecânicos ajustados (Processo que levou cerca de uma semana de trabalho muito pesado), o sistema podia ser montado/usado/desmontado em cerca de 3 horas.

Utilizamos para registro do experimento um videocassete caseiro, que mostrou bons resultados desde que as cabeças estivessem limpas.

Uma sequência completa levou 19,26 segundos e 296 quadros foram capturados durante a aquisição, numa resolução de 320 x 240 x 256 à 15 frames/s em um micro Pentium 100 Mhz com 64 Mbytes de Ram e Placa de Captura Cirrus Logic. O Arquivo final tinha cerca de 40 Mbytes.

O Erro máximo de ângulos de “*tuft*” parado foi de .1 radianos

Os vetores finais representando o Numero de “*tufts*” / ângulo de ataque para ângulo aumentando e ângulo descendo foi finalmente aplicado a uma rede Backpropagation de 1 elemento de entrada, 30 elementos escondidos e 1 elemento de saída em aproximadamente 10^6 Interações^[*], produzindo como resultado final o gráfico

Finalmente corrigimos a escala de ângulos para os ângulos reais. Da calibração dos ângulos de ataque observamos que o ângulo central (0°) corresponde à um ângulo de ataque de 10°

[*] Pode-se conseguir resultados tão bons quanto estes com 1/4 das interações

Fig.61 - Gráfico da Histerese no Estol Dinâmico

Neste gráfico podemos ver claramente o fenômeno a que nos propusemos investigar. Quando o ângulo aumenta, o Estol inicia-se a partir de 9° e quando diminuimos o ângulo de ataque o Estol tende a zero em 8° [Seddon90] [Tang95].

5.5. Observação de um “tuft” isolado.

Podemos agora, utilizando o mesmo conjunto de dados, observar o comportamento da variação angular de um “tuft” isolado em função do ângulo de ataque. Isto serviu como simplificação do método anterior.

Utilizaremos neste caso o conceito do histograma radial associado com a detecção de movimentos por subtração de imagens consecutivas.

Quando da escolha do “tuft” a ser observado, resolvemos pela utilização nesta fase, do segundo “tuft” mais próximo à semi-envergadura e na linha do bordo de fuga,

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

por estar este entre os primeiros a sofrer os efeitos da turbulência e o último a deixar de sofrer-los.

Optamos também por usar uma função contínua em função do número do frame e posteriormente fazer a conversão "frame"/ângulo de ataque. Isso faz com que se obtenha uma curva simples ao invés da curva composta pela histerese como da figura 60.

Utilizaremos para confronto com os dados da seção 5.4. a variação angular máxima do "tuft". Um fato importante para validação destes dados é que a perda de frames (Comentada em 2.4.2.) deve ser mínima. Para esta etapa usamos um computador Pessoal Pentium 100 Mhz com 64 Mbytes de Memória RAM. Neste caso as perdas com 320 x 240 *pixels* para uma imagem de 10 segundos foi inferior a 5%.

Neste caso alimentaremos um vetor $\delta(n) = |\text{ângulo do "tuft" no frame } n - \text{ângulo do mesmo "tuft" no frame } n-1|$ e $n = 1$ até n_{frames} capturados.

Ao final da carga deste vetor obtivemos um gráfico do tipo:

Fig. 62 - Gráfico de $\delta(n)$ por n

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Como desejávamos apenas a máxima variação angular selecionamos apenas os vetores do tipo $\delta(n-1) \leq \delta(n) \geq \delta(n+1)$.

Antes de aplicar a rede, utilizamos um artifício para facilitar a convergência dos dados. Sabemos que a função final (dada a função de ativação escolhida) será da forma $f(-x) = -f(x)$, neste caso criamos os pontos de ensinamentos desta forma. Isto mostrou obter resultados mais rapidamente.

Finalmente criamos uma rede neural do tipo Backpropagation com um elemento de entrada, quarenta e cinco elementos escondidos e um elemento de saída. Com $v_{\eta} = 0.1$, obtivemos após cerca de 10^6 interações o seguinte gráfico:

Como último passo, utilizamos o processo descrito em 5.2. para transformar a escala do eixo x em ângulo de ataque:

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig.65 - Eixo x legendado com ângulo de ataque

Novamente no gráfico da figura 63 é possível verificar o fenômeno da histerese, uma vez que durante o aumento do ângulo de ataque o “tuft” começa oscilar em torno do ângulo 0° e apenas volta ao repouso no ângulo -3° .

Podemos proceder da mesma forma com todos os “tufts” (total de 37 no experimento). Destacamos o resultado para os últimos “tufts”:

Fig.65 – A variação do último tuft é praticamente nula

Fazendo o acompanhamento da primeira linha próxima ao bordo de fuga, teremos como variações máximas:

Ao final da carga deste vetor obtivemos um gráfico do tipo:

Fig. 62 - Gráfico de $\delta(n)$ por n

Como desejávamos apenas a máxima variação angular selecionamos apenas os vetores do tipo $\delta(n-1) \leq \delta(n) \geq \delta(n+1)$.

Fig.63 - Pontos selecionados a partir do vetor δ

Antes de aplicar a rede, utilizamos um artifício para facilitar a convergência dos dados. Sabemos que a função final (dada a função de ativação escolhida) será da forma $f(-x) = -f(x)$, neste caso criamos os pontos de ensinamentos desta forma. Isto mostrou obter resultados mais rapidamente.

Finalmente criamos uma rede neural do tipo Backpropagation com um elemento de entrada, quarenta e cinco elementos escondidos e um elemento de saída. Com $v_{eta} = 0.1$, obtivemos após cerca de 10^6 interações o seguinte gráfico:

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Observando a fig. 68 podemos verificar que o eixo de simetria da figura não passa pelo ângulo de ataque máximo mas está deslocado a sua direita. Isso sinaliza o fenômeno da histerese, ainda que os dados não coincidam com os dados da figura 58 devido a ausência das outras linhas de "tufts".

5.6. Aplicação do tipo $\mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}$

Desejamos agora observar a máxima variação angular de cada "tuft" espalhado no plano da asa em função do ângulo de ataque.

Primeiramente alimentamos os vetores de entrada com os valores:

$entrada_x(frame) = coordenada\ x / comprimento\ total$
 $entrada_y(frame) = coordenada\ y / largura\ total$
 $entrada_a(frame) = \text{ângulo de ataque}.$

e o vetor de saída será

$saída(x,y, frame) = | \text{ângulo do "tuft" da posição } x,y - \text{ângulo de referência}.$

Fig. 69 - Posições e ângulos dos "tufts"

Para encontrarmos as máximas variações escolhemos os pontos do tipo

$saída(x,y, frame-1) \leq saída(x,y, frame) \geq saída(x,y, frame+1).$

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Usando estes pontos como entrada para uma rede neural do tipo Backpropagation com 3 elementos de entrada, 230 elementos na camada escondida e 1 elemento de saída e $v_{\eta} = .1$, podemos após cerca de 4×10^6 interações obter resultados com erros da ordem de 10^{-2} .

Dentre as inúmeras aplicações para este rede, dentre as quais pode-se reproduzir o gráfico da figura 60, podemos traçar um gráfico do tipo mostrado na figura 69, simulando o comportamento dos “tufts” arrancados no início do experimento, como mostram as figuras 70,71.

É possível também através da função gerada obter as curvas de nível da máximas variações como mostram as figuras 71 e 72. Através destas é possível estabelecer um critério e determinar a linha de separação, como mostra a figura 73, supondo que a variação do “tuft” na linha de separação seja de $\pm 0.4^\circ$. Esta linha é chamada de linha de separação da camada limite e é utilizada para acompanhar o deslocamento do Estol no aerofólio.

Fig. 70 - Variação máxima dos tufts para ângulos de ataque próximos de zero. Os “tufts” em vermelho são simulados

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Fig. 74 - Curva de nível para um ângulo de ataque de -1° . Destacando região de separação da camada limite

A partir da observação destes gráficos 72, 73 e 74 é possível ao projetista escolher a melhor posição para as superfícies de controle. Por exemplo o aileron é colocado nas extremidades das asas para que estes sejam os últimos a sofrerem o Estol, podendo manter a aeronave sob controle.

Conclusão

Desenvolvemos neste trabalho um experimento, que através do processamento digital de imagens, consegue registrar e exibir o fenômeno do Estol Dinâmico.

Este trabalho passou por um processo de simplificação desde os primeiros testes realizados. Não apenas no que diz respeito aos equipamentos mecânicos, como também nos algoritmos utilizados.

A simplificação dos métodos de aquisição dos dados e de seu processamento, tornou possível a execução de vários experimentos em uma mesma seção de ensaios.

Conseguimos portanto desenvolver um experimento que mesmo sendo relativamente de baixo custo, pode ser de extrema importância para o estudo de fenômenos aerodinâmicos.

Foram desenvolvidas novas técnicas para:

- Montagem de um “*hardware*” capaz de captar a imagem de um plano em movimento sobre seu eixo.
- Variação de algoritmos de histograma, para detecção do ângulo mais provável.
- Montagem de sub-rotinas capazes de implementar o algoritmo de Backpropagation em Visual Basic.
- Metodologia de detecção de parâmetros, como o ângulo de ataque, por medida indireta através da imagem.

Este trabalho pode ser ainda melhorado com o uso de um sistema com menor erro para a calibração dos ângulos.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Dentre os fatores que podem melhorar diretamente o desempenho dos resultados destacamos a substituição dos “*tufts*” por micro-“*tufts*” ou por tintas especiais [Oglesby95] e a substituição do sistema câmera/placa de aquisição para sistemas de melhor desempenho.

Como contribuições diretas de nosso trabalho, destacamos:

- O estudo do fenômeno de Estol dinâmico em perfil aerodinâmico a ser utilizado em helicópteros ou aeronaves acrobáticas.
- Simplificação da divulgação de resultados pelo uso de um padrão de arquivos de uso geral (.AVI).
- Criação de sub-rotinas manipuladoras de dados utilizando redes neurais.

Como continuação deste trabalho, citamos:

- Diminuição dos erros utilizando melhores equipamentos para calibrar os ângulos.
- Emprego de um motor para criar movimentos semelhantes ao rotor de helicóptero em relação à articulação de batimento.
- Observações do mesmo fenômeno em modelos tridimensionais.
- Na área de redes neurais, utilizar algoritmos capazes de adaptar v_{η} de forma que a curva convirja mais rapidamente.

Dentro do objetivo deste trabalho não desenvolvemos uma interface para facilitar a manipulação dos dados, preferindo ao contrário desenvolver funções de uso geral que podem ser utilizadas em qualquer programa.

Pode-se porém desenvolver com base nestas funções um “*software*” que permita ao usuário manipular as variáveis e as características das redes neurais.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

Utilizando os recursos do Visual Basic pode-se ainda criar interfaces gráficas facilitando o uso por qualquer usuário.

Esperamos ainda, com este trabalho, colaborar para a integração dos estudos de processamento de imagens aos estudos de aeronaves, trazendo para ambas as áreas novos desafios.

Da mesma forma, desejamos despertar nos futuros estudantes a integração de ambas as ciências.

Bibliografia

[Angelucci75] Angelucci, Enzo. **Os aviões: Dos primórdios da aviação até os dias atuais; A participação brasileira na conquista do espaço.** São Paulo: Melhoramentos, 1975.

[Aso95] Aso, Shigeru, Kumamoto, Yuchi. An experimental study on dynamic stall phenomena around a 2-dimensional airfoil oscillating in low pitch. **Technology Reports of Kyusu University**, Kyusu: vol. 68, no. 2, p. 129-136, 1995.

[Badgett94] Badgett, Tom, Sandler, Corey. **Criando Multimídia em seu PC**, São Paulo: Makron Books, 1994.

[Bowers84] Bowers, Peter. **Aeronaves não Convencionais**, São Paulo: Lutécia, 1984.

[Bueno96] Bueno, Samuel C. , Roda, Valentin O. Desenvolvimento de “*software*” e “*hardware*” para aquisição e processamento de dados de experimentos em túneis de vento, Simpósio Interno da Pós-Graduação do IFSC, 3º; São Carlos, 1996. **Resumos de Trabalhos**, São Carlos, 1996. p.36

[Downie97] Julia Downie. 1997 Homebuilt Directory, **Kitplanes**. Los Angeles vol. 13, no 12, p.32-98, dez 1996.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

[Freeman92] Freeman, James A. Neural Network in Mathematica®. **AI Expert**, n. 37, pp 27-35, November 1992.

[Galbiati90] Galbiati Jr., Louis J. **Machine vision and digital image processing fundamentals**. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

[Gonzales93] Gonzales, R.C., Woods, R.E. **Digital image processing**. Reading: Addison-Wesley, 1993

[Kermode42] Kermode, A.C. **The aeroplane structure: The design and the purpose of the parts of the aeroplane explained in simple language**. London: Sir Issac Pitman, 1942.

[Kittler85] Kittler, Josef , Duff, Michael J.B. **Image processing system architectures**. New York: John Wiley, 1985.

[Levine85] Levine, M.D. **Vision in man and machine**. New York: McGraw-Hill, 1985.

[Luppe97] Luppe, Maxmilian. **Desenvolvimento de um processador Pipeline dedicado para extração de bordas em tempo real**. (Dissertação de Mestrado): São Carlos: Instituto de Física de São Carlos - USP, 1997.

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

[Mankel97] Mankel, Roberto. **O helicóptero sem segredos: teoria de vôo e conhecimentos específicos de helicóptero.** São Paulo: Cmte Roberto Mankel, 1997.

[Microsoft93a] Microsoft. **Microsoft Excel version 5.0.** New York: Microsoft, 1993.

[Microsoft93b] Microsoft. **Microsoft Visual Basic version 3.0.** New York: Microsoft, 1993.

[NAC95] NAC. **Catalog of products: an overview of NAC high speed video and motion analysis system.** Washington: NAC, 1995.

[Oglesby95] Oglesby, Donald M., Puram, Chick K., Upchurch, Bully T. **Optimization of measurement with pressure sensitive paints. Nasa Technical Memorandum, n. 4695, Junho 1995.**

[Payne59] Payne, P.R. **Helicopter dynamics and aerodynamics.** Londres: Sir Issac Pitman, 1959.

[Pope66] Pope, Alan, Harper, John J. **Low Speed Wind Tunnel Testing.** New York: John Wiley, 1966

Utilização de processamento de imagens em aplicações da Aerodinâmica

[Romeny94] Romeny, Bart M. ter Harr. **Geometry Driven Diffusion in Computer**

Vision. Amesterdan: Kluwer Academic, 1994

[Roskam87] Roskam, Jan. **Airplane Design**, Ottawa: Roskan Aviation, 1987.

[Sears85] Sears, Francis, Zemansky, Mark W., Young, Hugh D. **Física**. Rio de

Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1985 Vol.2.

[Seddon 90] Seddon, J. **Basic Helicopter Aerodynamics** : An account of first

principles in the fluid mechanics and flight of single rotor helicopter, Oxford: BSP

Professional Books, 1990.

[Shaw94] Shaw, Willian T., Tig, Jason. **Applied Mathematica** ® . Reading: Addison -

Wesley, 1994.

[Souza91] Souza, Homero A. F. **Fundamentos de Aeronáutica**. São José dos

Campos: Embraer, 1991 (Apostila de Curso)

[Tang95] Tang, D.M. & Dowell, E.H. Experimental Investigal of Three-Dimensional

Dynamic Stall Model Oscillating in Pitch, **Journal of Aircraft**, AIAA, New York

vol. 32, no. 5, p. 1062-1071 , Set-Out 1995.

Apêndice A - Funções em Visual Basic

1) Função Tangente Hiperbólica

```
Function tanh (nn)  
    tanh = (Exp(nn) - Exp(-nn)) / (Exp(nn) + Exp(-nn))  
End Function
```

2) Função $\text{sech}^2(x)$ secante hiperbólica de x .

```
Function sech2 (x)  
    sech2 = (2 / ((Exp(x) + Exp(-x))) ^ 2)  
Rem sech2 = x * (1 - x)  
End Function
```

3) Função Nível de Cinza, Retorna um valor entre 0 a 255 correspondente ao nível de cinza ou -1 da cor para cores não cinza

```
Function nivel (cor)  
  
    nivel = -1  
    For i = 0 To 255  
        If cor = RGB(i, i, i) Then nivel = i  
    Next i  
  
End Function
```

4) Função Cor. A partir de um nível de Cinza retorna o código da cor cinza correspondente.

```
Function cor (nivel)  
  
    cor = RGB(nivel, nivel, nivel)  
  
End Function
```

5) Função reta. A partir da posição da sombra da câmera retorna o ângulo correspondente:

```
Function reta (x)  
    m = (6.60893276 + 3.72742719) / (6 - 195)  
    b = 6.60893276 - m * 6  
    reta = x * m + b  
End Function
```

7) Procedure init_var. Inicializa as variáveis globais que serão usadas nas procedures.

<i>jmax = 1</i>	<i>' Elementos de entrada</i>
<i>imax = 45</i>	<i>' Elementos da camada escondida</i>
<i>atual = 1</i>	<i>' Primeiro elemento a ser calculado</i>
<i>v_eta = Val(text8.Text)</i>	<i>' Coeficiente de aprendizado. Neste caso o valor de</i>
<i>entrada</i>	<i>' é ajustado em um textbox</i>

8) Procedure saída. Ajusta os valores de saída conhecidos para ensino. Utilizamos vários métodos de acordo com a necessidade.

8.1.) A partir de um arquivo tipo txt.

```
Open "c:\dados\dados.txt" For Input As #1
x = 0
Do While Not EOF(1)
    Input #1, u_saída_ang(x), u_saída_soma(x)
    u_saída_ang(x) = (5 + u_saída_ang(x)) / 12
    u_saída_soma(x) = u_saída_soma(x) / 40
    x = x + 1
Loop
Close (1)
```

8.2.) A partir de matriz de dados

```
ang(1) = 1.3 / 6
saída(1, 1) = 3
saída(1, 2) = 4
saída(1, 3) = 4
saída(1, 4) = 4
ang(2) = 1.4 / 6
saída(2, 1) = 6
saída(2, 2) = 5
saída(2, 3) = 4
saída(2, 4) = 4
ang(3) = 1.5 / 6
saída(3, 1) = 6
saída(3, 2) = 6
saída(3, 3) = 5
saída(3, 4) = 5
ang(4) = 1.6 / 6
saída(4, 1) = 6
```

```

saída(4, 2) = 6
saída(4, 3) = 6
saída(4, 4) = 5
ang(5) = 2.3 / 6
saída(5, 1) = 6
saída(5, 2) = 6
saída(5, 3) = 6
saída(5, 4) = 6
ang(6) = 2.6 / 6
saída(6, 1) = 8
saída(6, 2) = 8
saída(6, 3) = 8
saída(6, 4) = 8
ang(7) = 4.3 / 6
saída(7, 1) = 8
saída(7, 2) = 9
saída(7, 3) = 9
saída(7, 4) = 9
ang(8) = 5.8 / 6
saída(8, 1) = 11
saída(8, 2) = 10
saída(8, 3) = 10
saída(8, 4) = 10
For al = 1 To 8
For f = 1 To 4
saída(al, f) = saída(al, f) / 11 ' Normalização dos valores
Next f
Next al
    
```

8.3.) A partir de função. Utilizada no processo de testes da rede neural

```

function v_outDesired(v_inputs)
v_outDesired = sin(3.1415926 * v_inputs)
end function
    
```

9) Procedure Init_Wts. Inicializa os valores dos pesos com valores randomicos entre -1 e 1. Pode se alterado o valor da divisão nas linhas 2 e 7 para que os valores fiquem sobre outra faixa.

```

For i = 1 To imax
For j = 1 To jmax
v_hidWts(i, j) = (Rnd - .5) / 1
Next j
Next i
For i = 1 To imax
v_outWts(i) = (Rnd - .5) / 1
    
```


Next i

10) Procedure calcule. A partir de um vetor **v_inputs(n)** processa os novos valores para **v_outputs**

Sub calcule ()

```

    For i = 1 To imax
        v_hidOut(i) = 0
        For j = 1 To jmax
            If v_inputs(j) > 1 Then text5.Text = "Problema"    'Emite mensagem de
            problema                                         'caso o valor de
            intrada exceda                                  '1( função
            mal normalizada)
            v_hidOut(i) = v_hidOut(i) + v_hidWts(i, j) * v_inputs(j)
        Next j
        v_hidOut(i) = tanh(v_hidOut(i))
    Next i
    v_outputs = 0
    For i = 1 To imax
        v_outputs = v_outputs + v_outWts(i) * v_hidOut(i)
    Next i
    v_outputs = tanh(v_outputs)
    text3.Text = v_outputs
End Sub

```

11.) Procedure para salvar os valores dos pesos em um arquivo .txt. Esta procedure pode ser invocada de acordo com a necessidade. Em algumas aplicações chamamos de tempos em tempos, em outras apenas quando o valor do erro máximo era inferior a determinado valor pré-definido.

Sub salva ()

```

    Open "C:\bmps\bons_w.txt" For Output As #1
    For i = 1 To imax
        Print #1, v_outWts(i)
    Next i

    For i = 1 To imax
        For j = 1 To jmax
            Print #1, v_hidWts(i, j)
        Next j
    Next i
    Close (1)

End Sub

```

12.) Procedure para calculo do máximo erro. Calcula-se o valor $v_outputs$ para todos os conjuntos de dados conhecidos e subtrai-se do valor $v_outDesired$

```

maior = 0
For al = 1 To 8
    For f = 1 To 4
        v_inputs(2) = ang(al)
        v_inputs(1) = f / 4
        calcule (1)
        v_outDesired = saída(al, f)
        If Abs(v_outputs - v_outDesired) > maior Then maior = Abs(v_outputs
- v_outDesired)
    Next f
Next al
    
```

13.) Procedure que implementa o aprendizado da rede neural com dados entrados na forma do item 8.2.

```

atual = atual + 1
If atual > 8 Then
    atual = 1
End If

For f = 1 To 4

    v_inputs(1) = f / 4
    v_inputs(2) = ang(atual)
    v_outDesired = saída(atual, f)

    calcule ()
    v_outErrors = v_outDesired - v_outputs
    v_outDelta = v_eta * (sech2(v_outputs)) * v_outErrors
    For i = 1 To imax
        v_hidDelta(i) = v_eta * (sech2(v_hidOut(i)) * (v_outWts(i)) *
v_outDelta)
    Next i
    For i = 1 To imax
        v_outWts(i) = v_outWts(i) + v_outDelta
    Next i

    For i = 1 To imax
        For j = 1 To jmax
            v_hidWts(i, j) = v_hidWts(i, j) + (v_hidDelta(i))
        Next j
    Next i
    
```

Next f

14) Procedure que desenha o gráfico no *picturebox picture1* da função a partir dos dados conhecidos, e da rede neural esta procedure gerou o gráfico 61 por exemplo.

picture1.Cls

' Traça o grafico a partir da rede neural usando a procedure calcule

For f = -2 To 6 Step .01

For x = .1 To 1 Step .05

v_inputs(1) = x

v_inputs(2) = f / 6

aux_x = v_inputs(1)

calcule ()

aux_o = v_outputs

*' picture1.PSet (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) **

*aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o),*

*RGB((6 - f + 2) / 8 * 255, (f + 2) / 6 * 255, (6 - f + 2) / 8 * 255)*

*' picture1.PSet (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) **

*aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) - .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o),*

*RGB((6 - f + 2) / 8 * 255, (f + 2) / 6 * 255, (6 - f + 2) / 8 * 255)*

v_inputs(1) = x + .05

v_inputs(2) = f / 6

calcule ()

*picture1.Line (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) **
*aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o)-(1.1 **

** (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) * v_inputs(1), 1.1 **

*(picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * v_outputs), RGB((6 - f +*
*2) / 8 * 255, (f + 2) / 6 * 255, (6 - f + 2) / 8 * 255)*

*picture1.Line (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) **
*aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) - .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o)-(1.1 **

** (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) * v_inputs(1), 1.1 **

*(picture1.ScaleHeight / 2) - .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * v_outputs), RGB((6 - f +*
*2) / 8 * 255, (f + 2) / 8 * 255, (6 - f + 2) / 8 * 255)*

Next x

Next f

For f = 0 To 6

For x = .1 To 1 Step .05

v_inputs(1) = x

v_inputs(2) = f / 6

aux_x = v_inputs(1)

calcule (1)

aux_o = v_outputs

```

' picture1.PSet (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) *
aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o),
RGB((6 - f + 2) / 8 * 255, (f + 2) / 6 * 255, (6 - f + 2) / 8 * 255)
' picture1.PSet (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) *
aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) - .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o),
RGB((6 - f + 2) / 8 * 255, (f + 2) / 6 * 255, (6 - f + 2) / 8 * 255)
v_inputs(1) = x + .05
v_inputs(2) = f / 6
calcule (1)
picture1.Line (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) *
aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o)-(1.1
* (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) * v_inputs(1), 1.1 *
(picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * v_outputs), RGB(255,
255, 255)
picture1.Line (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) *
aux_x, 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) - .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * aux_o)-(1.1
* (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) * v_inputs(1), 1.1 *
(picture1.ScaleHeight / 2) - .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) * v_outputs), RGB(255,
255, 255)
Next x
Next f

For al = 1 To 8
For f = 1 To 4
v_inputs(2) = ang(al)
v_inputs(1) = f / 4
v_outDesired = saída(al, f)
picture1.PSet (1.1 * (picture1.ScaleWidth / 2) + .8 * (picture1.ScaleWidth / 2) *
v_inputs(1), 1.1 * (picture1.ScaleHeight / 2) + .8 * (picture1.ScaleHeight / 2) *
v_outDesired), RGB(255, 0, 0)
Next f
Next al

```

15.) Mesmo conceito do anterior, utilizado para gerar o gráfico da Fig. 59

```

picture1.Cls
For f = -1 To 1 Step .001
v_inputs(1) = f
calcule (1)
picture1.PSet (1000 + 1000 * f, 1000 + 500 * v_outputs), RGB(255, 0, 0)
Next f

For f = 0 To 160
picture1.Circle (1000 + 1000 * u_saída_ang(f), 1000 + 500 * u_saída_soma(f)), 5,
RGB(255, 0, 0)
Next f

```

```
picture1.Line (1000 + 1000 * d_saida_ang(5), 0)-(1000 + 1000 * d_saida_ang(5),  
2000)
```

```
picture1.Line (0, 1000)-(2000, 1000)
```

```
For f = 0 To 160
```

```
    picture1.Line (1000 + 1000 * d_saida_ang(f), 1000)-(1000 + 1000 *  
d_saida_ang(f), 1050)
```

```
Next f
```

```
For f = -1 To 1 Step .001
```

```
    v_inputs(1) = f
```

```
    calcule (2)
```

```
    picture1.PSet (1000 + 1000 * f, 1000 + 500 * v_outputs), RGB(0, 0, 255)
```

```
Next f
```

```
For f = 0 To 160
```

```
    picture1.Circle (1000 + 1000 * d_saida_ang(f), 1000 + 500 * d_saida_soma(f)), 5,  
RGB(0, 0, 255)
```

```
Next f
```

16.) Procedure que encontra ângulo mais provável e traça linha correspondente:

Gerou o gráfico da figura

57 e 58.

```
For tt = 0 To 2 * 3.14159265432 Step .1
```

```
    vetor(wq) = 0
```

```
    ang(wq) = tt
```

```
For r = 0 To 10
```

```
    xb = Int(b + r * Cos(tt))
```

```
    xa = Int(a + r * Sin(tt))
```

```
    n0 = nivel(picture1.Point(xb, xa))
```

```
    text1.Text = n0
```

```
    If old_xa <> xa Or old_xb <> xb Then vetor(wq) = vetor(wq) + n0
```

```
    old_xa = xa
```

```
    old_xb = xb
```

```
Next r
```

```
wq = wq + 1
```

```
Next tt
```

```
xwq = 0
```

```
mwq = 0
```

```
maior = vetor(0)
```

```
mwq = 0
```

```
Do While xwq <= wq
```

```
If vetor(xwq) > maior Then
    maior = vetor(xwq)
    text2.Text = xwq
    mwq = xwq
End If
xwq = xwq + 1
Loop
For r = 0 To 10
    xb = Int(b + r * Cos(ang(mwq)))
    xa = Int(a + r * Sin(ang(mwq)))
    picture1.PSet (xb, xa)
Next r
```


APÊNDICE B - Desenho das peças mecânicas

FIG. 1
MEDIDAS EM MILÍMETROS

LEGENDA

AÇO
BRONZE
PLÁSTICO (PVC)

LEGENDA

MADEIRA

FIG. 2

MEDIDAS EM MILÍMETROS

ELEVACÃO

FIG. 3

VISTA LATERAL

LEGENDA

MADEIRA

FIG. 2
MEDIDAS EM MILÍMETROS

CORTE B-B

ELEVAÇÃO

FIG. 3

VISTA LATERAL