UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE FÍSICA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

"DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA
VERSÁTIL DE POSICIONAMENTO
PLANO DE PRECISÃO PARA
INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA
E DISCUSSÃO DAS APLICAÇÕES
INDUSTRIAIS.

Tese apresentada junto ao Instituto de Física
e Química de São Carlos para obtenção do título
de Doutor em ciências "Física Aplicada"

AUTOR: Ms. José Guilherme Sabe

ORIENTADOR: Prof. Dr. Annie France Fréré Slaets

- SÃO CARLOS - SP - 1993 -

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE JOSE GUILHERME SABB APRESENTADA AO INSTITUTO
DE FÍSICA E QUÍMICA DE SÃO CARLOS, DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 17/06/1992

COMISSÃO JULGADORA:

Profa. Dra. Annie France Frere Slaets

Prof. Dr. Adilson Gonzaga

Prof. Dr. Robert Lee Zimmerman

Prof. Dr. João Fernando Gomes de Oliveira

Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto

RESUMO

Foi desenvolvido um sistema posicionador plano de precisão da ordem de micrometros concebido para possuir as qualidades revelantes e a versatilidade necessária a possibilitar várias aplicações em inspeção visual automática.

As aplicações consideradas foram inspeção visual automática em ambiente industrial para análise de falhas em linhas de montagem, su-sistemas digitalizadores (microdensitômetros) de imagens médicas, geração de circuitos impressos multicamadas.

ABSTRACT

It has been developed a positioning system in the plane, with a precision around micrometers. The system was designed to have quality and versatility that are need in several automatical visual analisys.

The applications considered were automatical visual analisys in industry for detection of faitures in assembly lines, digitalization system (in microdensitometry) of medical images, generation of mult-layer printed circuits.

CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

- Trata-se de um PPP desenvolvido com tecnologia totalmente disponível no país.

- As características de versatilidade e precisão apresentadas pelo PPP permitem sua aplicação a uma grande variedade de problemas.

- Dentre essas aplicações destacam-se a de controle de qualidade de peças mecânicas em que, abaixo custo, consegue-se melhores resultados que com outros equipamentos em especial os importados.

- Outra linha de aplicações que se abre é a dos digitalizadores micrométricos. Nesta linha o PPP se comporta destacadamente. Comparado com equipamentos importados apresenta características que o fazem sobressair-se pela sua versatilidade e precisão.

- Ainda mais, quanto às aplicações na fabricação de circuitos impressos o sistema leva vantagem sobre os equipamentos de "plotagem" seja pela capacidade de trabalhar com chapas de maiores dimensões, seja por possibilitar a precisão indispensável ao trabalho em placas de multicamadas.

ÍNDICE

1- INTRODUÇÃO.....	01
1.1.- REQUISITOS E OBJETIVOS DESTE TRABALHO.....	01
1.2.- VISÃO HUMANA, VISÃO ARTIFICIAL E INSPEÇÃO VISUAL...	03
1.3.- PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES.....	06
1.3.1.- INSPEÇÃO DE PEÇAS MECÂNICAS EM INDÚSTRIAS..	06
1.3.2.- DIGITALIZADORES (MICRODENSITOMETROS).....	07
1.4.- TECNOLOGIAS DE SENSORES ENVOLVIDAS EM INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA.....	08
1.5.- APRESENTAÇÃO DA TESE.....	12
2- MÉTODO DE INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA E PERSPECTIVAS E APLICAÇÃO.....	13
2.1.- INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA.....	13
2.2.- COMENTÁRIOS BIBLIOGRÁFICOS SOBRE CONTROLE DE QUALI- DADE DE PEÇAS POR INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA.	15
2.3.- MICRODENSITÔMETROS.....	27
2.3.1- DEFINIÇÃO E ESTRUTURA DE UM DIGITALIZADOR..	27
2.3.2- CARACTERÍSTICAS DE UM DIGITALIZADOR DE IMAGENS E REQUISITOS FUNCIONAIS.....	30
2.3.3- CLASSIFICAÇÃO DOS VARREDORES DE IMAGENS....	32
2.3.4- COMPARAÇÕES ENTRE OS SISTEMAS DE VARREDURA.	39
2.4.- TIPOS DE MICRODENSITETROS COMERCIAIS OU ENCONTROS NA LITERATURA CIENTÍFICA.....	45
2.4.1- SISTEMAS VARREDORES COM TUBOS DE RAIOS CATÓDICOS.....	45

2.4.2-	SISTEMAS VARREDORES COM MESA PLANA.....	46
2.4.3-	SISTEMAS VARREDORES COM TAMBOR ROTATÓRIO.....	54
3-	A TECNOLOGIA DO CONTROLE ADAPTATIVO.....	65
3.1-	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65
3.2-	CONTROLADORES AUTO-AJUSTÁVEIS.....	65
3.3-	STC COM VARIAÇÃO FORÇADA.....	67
3.4-	STC PARA IMPLEMENTAÇÃO EM UM ÚNICO "CHIP".....	69
3.5-	STC EXTENDIDO (MELHORADO).....	70
3.6-	STC COM CONVERGÊNCIA "DEAD-BEAT".....	71
3.7-	STC PREDITIVO.....	72
3.8-	STC COM PARÂMETROS DE VARIAÇÃO RÁPIDA.....	74
3.9-	STC DUPLA FAIXA DE AMOSTRAGEM.....	75
3.10-	STC QUADRÁTICO LINEAR PARAMETRICO.....	79
3.11-	AUTO REGULADOR MUSMAR.....	80
3.12-	STC COM AUTO-ALOCÇÃO DE POLOS.....	81
3.13-	CONTROLE DISTRIBUIDO USANDO STR.....	81
3.14-	ELIMINAÇÃO DE "OFF-SET" EM STC.....	83
3.15-	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
4-	ASPECTOS TEÓRICOS DA REALIMENTAÇÃO EM MALHA FECHADA.....	92
4.1-	INTRODUÇÃO.....	92
4.2-	PID IDEAL E PID REAL.....	94
4.3-	CONTROLE PID DIGITAL.....	99
4.3.1-	OS PLANOS S,W E Z.....	100
4.3.2-	TÉCNICA DE DIGITALIZAÇÃO.....	103
4.3.3-	TÉCNICA DIR.....	107
4.4-	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

5- PROJETO DE UM POSICIONADOR PLANO DE PRECISÃO (PPP) PARA INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA USANDO TECNOLOGIA DE CONTROLE ADAPTATIVO, BASEADO NA REALIMENTAÇÃO EM MALHA FECHADA.....	110
5.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	110
5.2- DESCRIÇÃO DO PPP.....	110
5.2.1- CONTROLADOR DE VELOCIDADE PID.....	110
5.2.2- MICROPROCESSADOR CONTROLADOR DE POSIÇÃO.....	116
5.3- DESCRIÇÃO DO SISTEMA MECÂNICO.....	119
6- METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS MEDIDAS E RESULTADOS OBTIDOS.....	123
6.1- INTRODUÇÃO.....	123
6.2- CALIBRAÇÃO GEOMÉTRICA DO PPP.....	125
6.3- IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PARA INSPEÇÃO DE COMPONENTES	
6.3.1- INSPEÇÃO DE UM COMPONENTE MECÂNICO.....	133
6.3.1.1- DESCRIÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO.....	135
6.3.1.2- RESULTADOS OBTIDOS.....	138
6.3.2- INSPEÇÃO DE UMA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO...	144
6.3.2.1- DESCRIÇÃO DO SISTEMA UTILIZADO.....	144
6.3.2.2- RESULTADOS OBTIDOS.....	146
6.4- CONCLUSÕES.....	149
7- CONCLUSÃO.....	150

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. REQUISITOS E OBJETIVOS DESSE TRABALHO

O objetivo primordial do presente trabalho é o desenvolvimento de um sistema de varredura de alta precisão. Tal sistema foi concebido para possuir as qualidades relevantes e a versatilidade necessária a possibilitar várias aplicações em inspeção visual automática.

As possíveis aplicações são as mais diversas, entre as quais destacam-se: a inspeção para controle de qualidade de produção industriais de alta confiabilidade, a digitalização micrométrica de filmes e a fabricação de circuitos impressos supervisionada por computador.

Estas tarefas são tradicionalmente realizadas utilizando-se recursos da digitalização de imagens que são basicamente de dois tipos: (1) sistema composto por uma câmera, um digitalizador e um

módulo de processamento e armazenamento: (2) dispositivos contendo um sensor óptico, um sistema de varredura e um digitalizador.

O controle de qualidade de alta confiabilidade é geralmente realizado utilizando-se o primeiro sistema acima em razão das limitações dos módulos de varredura até agora desenvolvidos. Entretanto, os sistemas baseados em câmeras necessitam de um processamento sofisticado para efetuar a inspeção visual com grande precisão.

Por outro lado, as mesas de varredura utilizadas atualmente apresentam limitações que tornam a aquisição das imagens demorada e resultam em armazenamento de muitos dados desnecessários. Isso, tanto nas aplicações de controle de qualidade como na digitalização.

Na fabricação de circuitos impressos, utilizam-se geralmente sistemas que deslocam a fonte de luz usada para gravar as trilhas. Por isso, limita-se o tamanho das placas ao máximo deslocamento permitido para a fonte. Entretanto, com um sistema de varredura que desloca a placa, o deslocamento da fonte pode ser expandido, sem qualquer modificação no sistema de iluminação e no "software".

Propõe-se portanto um sistema de varredura com precisão de 0.01 mm. e ótima repetibilidade, que possibilite varreduras pré-programadas de áreas não somente retangulares mas também circulares, ovais ou quaisquer outras que sejam do interesse do usuário, bem como um acesso direto à área de interesse sem necessidade de que a varredura cubra as regiões intermediárias. O

sistema também deve apresentar a possibilidade de mudar durante o procedimento de varredura, a velocidade do processo, o espaçamento entre as leituras e a trajetória, sem perda da precisão. Se o projeto do módulo de varredura for bem elaborado, poderá ser utilizado para muitas aplicações. Entretanto, o sensor óptico deverá ser adaptado para cada caso.

O módulo mais complexo, mais oneroso e mais difícil de ser elaborado consiste no sistema de varredura, que está-se propondo neste trabalho. A vantagem, apresentada é que com simples adaptações, é possível utilizá-lo em inúmeras formas de aplicações práticas.

1.2. VISÃO HUMANA, VISÃO ARTIFICIAL E INSPEÇÃO VISUAL

A visão de máquina ou visão artificial pode ser compreendida através da comparação com visão humana [We 83]. O processo de visão humana envolve a imagem formada nos olhos e enviada a uma determinada região do cérebro para compreensão. Os dados obtidos resultam em decisões que transmitem comandos para os músculos determinando a realização de alguma operação. Em um sistema de visão artificial, uma câmera ou qualquer sensor óptico faz a analogia do olho humano, cuja informação depois de digitalizada é enviada a um processador onde um algoritmo interpreta a imagem o processo de decisão pode ser complementado com braços mecânicos que exercem a função dos músculos para movimentação e execução de

operações.

Quando associa-se a rapidez eletrônica de aquisição da imagem, seu processamento digital para realçar formas, bordas ou defeitos e a capacidade de decisão do ser humano, envolvendo conceitos subjetivos num só processo, tem-se os sistemas de inspeção visual automática.

Em um processo completo de visão artificial, ou visão por computador [Go 82], cinco níveis de operação podem ser observados conforme mostra o diagrama em blocos da Fig. 1.1 Entretanto, necessita-se paenas dos níveis de sensoriamento e segmentação para um sistema de inspeção visual automática. o sensoriamento engloba a captação e a digitalização do sinal e a segmentação significa a determinação das características sob inspeção. Isto equivale a dizer que os desenvolvimentos tecnológicos de novos sensores, novos métodos e a implementação de novos algoritmos de processamento da imagem digital permitem a versatilidade das técnicas de inspeção.

A teoria e as técnicas de "Reconhecimento de Padrões" podem ser empregadas [Fu 82] no sentido de automatizar, a maiores níveis, o sistema de inspeção visual. O compromisso, no entanto, entre velocidade de decisão e a subjetividade da mesma em alguns casos, torna inviável a geração de algoritmos gerais que satisfazem a implementação destes sistemas.

VISÃO ARTIFICIAL E INSPEÇÃO VISUAL
FIG. 1.1

1.3. PERSPECTIVAS DE APLICAÇÕES

1.3.1. Inspeção de peças mecânicas em indústrias

Encontrar e classificar defeitos em peças fundidas, usinadas ou tratadas nas indústrias mecânicas é uma área de ação que possui um grande número de pessoas trabalhando ainda em inspeção visual manual. Este é um local onde um sistema automático de inspeção pode aumentar sensivelmente o número de peças/dia inspecionadas em uma área de produção. Como exemplo temos o citado em [Ke 86], onde um sistema de inspeção visual automática implantado em uma empresa de fabricação de carcaças de máquinas, reduziu o tempo de 20 horas para apenas 1 hora na inspeção de uma unidade.

Uma necessidade inerente aos métodos de inspeção é que tanto o objetivo a ser inspecionado quanto os defeitos a serem identificados devem ser conhecidos quando do projeto do sistema. Estas informações constituirão o banco de dados necessários aos algoritmos de localização dos defeitos ou determinação de sua forma. Portanto, o compromisso existente entre aumento da resolução para maior confiabilidade e conseqüente aumento no tamanho do banco de dados com redução da velocidade, deve ser solucionado através de novas técnicas. O atual estado da arte leva-nos a deduzir que, utilizando-se sensores ou câmeras com maior resolução e sistemas mecânicos de precisão, o resultado é um fatal acréscimo no banco de dados das peças a serem inspecionadas.

Propõe-se, portanto a utilização, por exemplo, do sensor óptico com feixe Laser desenvolvido por A. Gonzaga ([Go 91]), cujo raio refletido é captado por um único fototransistor, e o deslocamento no plano X-Y do objeto a ser inspecionado, analisando cada varredura separadamente. A precisão do sistema residirá na precisão do diâmetro do feixe de Laser, sem sua colimação e na resolução da mesa de deslocamento do objeto.

O sistema citado acima permite, a observação de trincas micrométricas antes do processo de usinagem, assim como o reconhecimento de defeitos, mesmo pequenos, nos formatos das peças.

1.3.2. Digitalizadores (Microdensitômetros)

A partir de uma criteriosa revisão bibliográfica e um extensivo estudo de mercado, foi possível chegar a algumas conclusões a respeito dos principais problemas existentes entre os digitalizadores comerciais e os encontrados na literatura. A conclusão mais importante é que os últimos não têm versatilidade: se uma determinada digitalização se inicia com o mesmo tamanho de foco de leitura e uma dada velocidade (passo) de varredura, por exemplo, ela permanecerá com esses parâmetros inalterados até terminar, ou seja, só se pode mudar esses comandos após cada digitalização.

Considerando-se, então, os requisitos de precisão e repetibilidade e os problemas mencionados acima, propõe-se o

desenvolvimento de um sistema mecânico de varredura com controle numérico que satisfaça tanto os aspectos essenciais de precisão quanto a versatilidade necessária. Para tanto, ele poderá ser digitalizada, ou seja, permitir um deslocamento do sensor mais rapidamente em certas regiões e mais lenta e minuciosamente em outras também de interesse. Além disso, a digitalização poderá ser feita em áreas não apenas retangulares, mas também circular, oval ou de qualquer outra forma que seja de interesse do usuário, além do que sistema proporcionará um acesso mais imediato a áreas localizadas em qualquer posição sem necessidade de passar por todas as regiões intermediárias como ocorre, por exemplo, com o tambor rotatório.

Ao sistema mecânico de varredura programado seria colocado um sistema, por exemplo, composto por uma fonte Laser acoplada a uma fibra óptica, um receptor e um sistema digitalizador desenvolvido por U. Winking [Wi 90] em trabalho preliminar.

1.4 TECNOLOGIA DE SENSORES ENVOLVIDAS EM INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA.

Como as aplicações são as mais diversas possíveis, pois a grande variedade de produtos industrializados requer sistemas dedicados a cada caso, o estado da arte depende da evolução de várias técnicas e sistemas. Dentre as diversas tecnologias de sensores aplicáveis em inspeção visual automática, pode-se citar as mais importantes: laser, fibras ópticas, holografia, técnicas

de iluminação, termografia, radiografia, ultra-sonografia, semicondutores, entre outros, são exemplos de tecnologias que contribuem sensivelmente para um sistema dedicado de inspeção visual automática.

Na maior parte dos trabalhos em inspeção visual automática utilizam-se câmeras do tipo vidicon ([Ya 77], [Ag 80], [Go 80]) ou de estado sólido ([Ra 87]). No entanto, a técnica de varredura por feixe de Laser tem despontado como uma excelente alternativa para casos específicos onde a medida ou a determinação de características necessitem de uma maior precisão ([Ja 83], [Ri 84]).

Os vidicons são as câmeras normais de TV. Sua utilização tem sido amplamente difundida apesar de problemas relativos a ruídos, variações e distorções no sinal que faz com que freqüentemente devam ser ralinhas e reajustadas. A resolução dos dispositivos sensores de imagem influenciam de forma contundente no custo do sistemas de visão artificial. O aumento da resolução aumenta a confiabilidade e a flexibilidade mas reduz a velocidade de operação e aumenta os custos devido as necessidades de "hardware".

Os sensores semicondutores consistem em arranjos de elementos foto-sensíveis dispostos de formas diversas e de diversos tamanhos. Estes dispositivos são mais econômicos do que os vidicons e também mais duráveis. Apresentam distorções aceitáveis e adequam-se melhor às aplicações em ambiente industrial. Os sensores semicondutores (CCD) ([We 83]) são organizados, em geral, na forma linear ou na forma matricial. Utiliza-se o arran-

jo linear em linhas de montagem sobre esteiras rolantes conforme mostra a Fig.1.2. O movimento de um objeto na direção perpendicular à varredura do arranjo produz a imagem bifimensional necessária para se inspecionar. O movimento da esteira, no entanto, deve ser preciso tal qual a menor resolução do elemento sensor disposto no arranjo. Isto leva a concluir que se uma mesa X-Y de alta precisão e desempenho puder deslocar a peça a ser inspecionada sob um sensor semiconductor único, os erros oriundos de diferenças entre elementos do arranjo serão eliminados e uma imagem de alta confiabilidade poderá ser obtida.

O que pode-se reafirmar é que a análise de cada caso em inspeção visual permitirá a adoção de recursos específicos tanto de "hardware" como de algoritmos que melhorem o desempenho de todo o sistema. Por exemplo, um arranjo especial de iluminação ([Ke 86]) pode reduzir substancialmente a quantidade de dados a serem processados na inspeção de partes eletrônicas. Controlando-se os ângulos de incidência das fontes luminosas, os sistemas podem realçar detalhes importantes a serem inspecionados. Desta forma, algoritmos propriamente projetados para detectar estas características podem ser usados ao invés do processamento "pixel" a "pixel", se o sistema fosse generalizado.

ARRANJO SEMICONDUTOR COM ESTEIRA ROLANTE

FIG. 1.2

1.5. APRESENTAÇÃO DA TESE

Como o trabalho visa o desenvolvimento de um sistema de varredura para aplicações em controle de qualidade e digitalização de imagem, no segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre inspeção visual automática. Sendo o sistema de varredura um sistema em malha fechada implementado através de controladores PID, o terceiro e o quarto capítulos versam sobre esse assunto.

Descreve-se o projeto em si no quinto capítulo, enquanto que no sexto apresenta-se a metodologia para chegar-se a resultados confiáveis mostrando-se os resultados obtidos nos testes.

O sétimo capítulo traz as conclusões, enquanto que apresenta-se as referências bibliográficas inerentes a cada capítulo, no final do mesmo na ordem de citação.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA E PERSPECTIVAS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo, examina-se o método e a utilidade da inspeção visual automática. e duas aplicações são discutidas.

2.1. Inspeção Visual Automática

A expectativa da indústria em obter cada vez mais produtos de alta confiabilidade, a competitividade entre diversos fabricantes de um mesmo item e a redução dos custos finais tem levado a um progresso significativo da inspeção visual nos últimos anos.

A maioria dos produtos são hoje inspecionados. Quando uma determinada máquina é colocada no mercado, uma lista de peças de reposição é fornecida e estas devem ser compatíveis com as peças adjacentes em operação. Quando um determinado processo de produção resulta em peças defeituosas, a inspeção visual pode rapidamente levantar dados suficientes para a correção do problema. A necessidade de segurança em determinadas atividades, tais como, aviação, indústria automotiva, navegação, etc., tem na inspeção visual a contribuição para a proteção da vida humana. Ou ainda, essa inspeção pode prever a contaminação de ligas em estruturas e desta forma evitar grandes acidentes.

A operação de inspecionar envolve a comparação entre o produ-

to real industrializado, ou parte dele, com características específicas de padrões. A inspeção visual pode e tem sido realizada em grande parte das empresas, de forma manual. Isto justifica, em alguns casos, a existência de departamentos inteiros dedicados à inspeção manual dos produtos fabricados. Nos últimos anos, com o avanço da informática, mecânica e eletrônica tem-se, cada vez mais desenvolvido novas técnicas dedicadas à inspeção visual automática e custos ralmente compatíveis.

Diversas características podem ser inspecionadas de forma automática utilizando-se recursos de digitalização de imagens e processamento da imagem digital.

No entanto, várias restrições devem ser avaliadas na utilização de inspeção visual automática em indústrias [Ba 85]. Estas restrições podem ser descritas como caráter operacional, ambiental e intrínseco.

As restrições de caráter operacional tanto técnicas quanto gerenciais, estão ligadas à necessidade de pessoal especializado para operação, manutenção e interpretação de todo o sistema. As de caráter ambiental estabelecem que equipamentos de inspeção visual não devem permanecer expostos a vibrações, sujeira, ataques químicos e outros efeitos próprios de ambientes industriais. Isto não quer dizer que estes equipamentos devam ficar em salas limpas, totalmente isolados do processo de produção. Alguns cuidados sim, são necessários para uma maior confiabilidade na inspeção.

As restrições intrínsecas estão relacionadas à capacidade e

disponibilidade de equipamentos específicos para aplicação particulares. A precisão é o primeiro ponto considerado. Outros, tais como, resolução, limite de operação, porcentagem de erro e repetibilidade são as características mais exigidas em um sistema de inspeção visual automática.

As vantagens, entretanto, superam as restrições quando o elemento custo final pode ser considerado. A informação de um produto pode ser armazenado e processada rapidamente. A velocidade da inspeção aumenta a velocidade da produção, mesmo quando as peças sob inspeção são complexas. A integração entre a inspeção e o processo de produção permite um produto mais confiável, sem contar que não existindo contato humano não haverá possibilidade de acidentes de trabalho.

Finalmente, os sistemas de inspeção visual automática permitem que os padrões de testes sejam consistentes e mais objetivamente aplicados do que quando inspecionados manualmente.

2.2. COMENTÁRIOS BIBLIOGRÁFICOS SOBRE CONTROLE DE QUALIDADE DE PEÇAS POR INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA.

Uma grande quantidade de artigos e tutoriais têm sido publicados na última década, abrangendo a visão artificial em computadores e a inspeção visual automática. Muitos destes artigos enfocam o controle de uma fábrica ou do processo de produção de maneira automatizada através do reconhecimento visual. Esta área denominada de "Visão Computacional" tem apresentado gargalos

devido à grande necessidade de processamento de imagens para o reconhecimento automático. A tecnologia para se aumentar a velocidade dos microcomputadores encontra-se ainda em desenvolvimento

No que se refere à inspeção visual automática, a velocidade não é elemento que impõe as maiores restrições, mas sim o estudo do custo/benefício da implantação do sistema.

O artigo de Kruger e Thompson [Kr 81] apresenta um sumário e um resumo de técnicas e aplicações relevantes nesta área. Eles mostram exemplos genéricos de inspeção visual, reconhecimento e montagem de componentes discretos. Discutem também alguns sistemas que exemplificam o atual estado da arte. Em inspeção de partes industriais, mostram um método de detecção de bordas de peças mecânicas utilizando uma estrutura de controle da análise da cena. As peças, sem oclusão de uma sobre outra, são colocadas em uma esteira rolante em qualquer posição estável. Uma câmera formada por 128 diodos em um arranjo linear faz a varredura sobre estas, fornecendo uma imagem binária. A esteira funciona como o eixo "y" e a câmera varre no sentido do eixo "x". As bordas são extraídas através da variação de um nível "zero" para "um" ou vice-versa. Um analisador de conectividade faz a ordenação das peças e o resultado é apresentado como na Fig. 2.1.

O processo de identificação das peças utiliza uma técnica estatística em árvores hierárquicas. Sete características são então, extraídas e analisadas:

- 1) O perímetro do objeto.

- 2) A raiz quadrada da área.
- 3) A área total dos furos.
- 4) O raio máximo.
- 5) O raio mínimo
- 6) O raio médio.

- 7) A compacidade $(1)/(2)$

Esta abordagem estrutural a média de cada uma das características extraídas sobre um conjunto de treinamento de dados de cada peça. A média com a mais alta aproximação da característica analisada é selecionada e o primeiro nó da árvore hierárquica é então gerado. Este critério é então aplicado recursivamente até que toda a peça esteja identificada. A técnica é bastante rápida por causa do sistema de aquisição da imagem e da limitação do universo de identificação.

Neste artigo, os autores também fazem considerações econômicas e dão algumas recomendações para nortear futuras investigações. A questão está centrada sobre a necessidade ou não de automação. Entre as considerações econômicas tem-se, por exemplo, o cálculo de que um trabalhador custa nos Estados Unidos entre \$3,80 a \$14.00 por hora e que o custo de um sistema de automação pode se previsto em aproximadamente \$4.60 /h. E observado também que um robô compete favoravelmente com o trabalho manual em processos de automação fixos que constituem 75% das operações de manufatura nos Estados Unidos, enquanto que 17% dos trabalhadores na produção estão envolvidos em tarefas de

IMAGENS OBTIDAS POR DETECÇÃO DE BORDAS
OU PEÇAS INDUSTRIAIS

FIG. 2.1

montagem e 10% em tarefas de inspeção. Portanto, o mercado potencial para automação através de inspeção é viável por diversos pontos de vista.

Entre as recomendações consta que as escolhas das estruturas de controle e de "hardware" devem ser feitas cuidadosamente. A maioria dos sistemas instalados nos Estados Unidos naquela época era ainda com computadores de médio porte, de uso geral e não através de sistema dedicados. Outra recomendação relevante é que a tecnologia de CAD/CAM deve ser integrada com os sistemas de visão para montagem e inspeção. Isto simplificaria o projeto e a fabricação das partes subsequência facilidade na inspeção automática baseada nos modelos gerados. Este trabalho conclui finalmente que a eficácia das técnicas em inspeção visual automática, depende não somente de fatores técnicos mas também de considerações econômica.

Um dado interessante fornecido por Yachida e Tsuji [Ya 80] é que havia em 1980 cerca de 40.000 robôs industriais de todos instalados no mundo. Desde total, 30.000 estavam em uso no Japão até aquele ano. As razões enumeradas pelos autores é que primeiro existe uma atitude cooperativa entre trabalhadores, empresários e governo para novos desenvolvimentos tecnológicos. Há também uma percepção natural da real necessidade de automação da produção de médio e grande volume. A indústria japonesa é experiente e não tem medo da introdução de computadores e sistemas baseados em microprocessadores na automação de suas fábricas. Finalmente, existe uma tradição de transferência de tecnologia da pesquisa

básica para a área prática na indústria japonesa.

Em outro artigo, Jarvis [Ja 80] usa três exemplos práticos para ilustrar a natureza das técnicas de inspeção visual automática e também discute seus problemas. O primeiro exemplo é o da inspeção de condutores metálicos montados em um cabo através de duas peças de plástico envoltentes. Os problemas de inspeção visual relacionados a este caso consistem em: primeiro, determinar se os contatos metálicos estão presentes na posição correta relativamente ao invólucro de plásticos; segundo, se o material que faz a colagem das partes plásticas está uniformemente distribuído pela peça. O segundo exemplo discutido, consiste na inspeção de contatos de chaves seladas. Este objeto é caracterizado por uma superfície reflexiva de vidro. Os defeitos a serem inspecionados são assimetrias e trincas na região onde o metal e o vidro se encontram. O terceiro exemplo analisado é inspeção de placas de fiação impressa. O objetivo é inspecionar materiais indesejáveis, pequenos furos ou trincas nos condutores e larguras insuficientes das trilhas. A diferença entre este exemplo e os outros dois é que neste caso a imagem gerada para análise pode ser bonária, o que facilita os algoritmos de detecção.

Chin e Harlow [Ch 82] apresentam uma boa revisão sobre o assunto e discutem a inspeção de placas de circuito impresso, máscaras fotográficas e pastilhas de circuito integrado.

Uma lista bastante elucidativa é encontrada em [Po 80] abrangendo vários tipos de técnicas de inspeção visual utilizadas em indústrias. Neste trabalho é possível observar que nos métodos

de uma maneira geral, incidem um feixe de luz coerente ou difusa, sobre a parte a ser visualizada e detectam sua reflexão. O problema é que a precisão depende enormemente dos sistemas de deflexão para captação da imagem. A Fig. 2.2. ilustra este processo.

O artigo apresentado por Chin [Ch 86] faz um estudo comparativos entre alguns algoritmos de reconhecimento baseado em modelos de objetos, em linha de montagem industrial. Estes algoritmos permitem determinar a posição e a orientação de peças industriais distribuídas aleatoriamente.

A obra que, discute com grande clareza as considerações econômicas, técnicas e industriais sobre a inspeção visual automática, é o livro de Batchelor [Ba 85]. Como cada caso é um caso dedicado para aquisição da imagem, o capítulo sete deste livro ilustra 63 (sessenta e três) métodos de iluminação e técnicas de visualização para posterior aquisição da imagem. Cada método é apresentado em termos do objetivo, do equipamento necessário e das aplicações típicas com comentários específicos em cada um. Isto permite uma idéia global dos problemas e das possíveis soluções existentes.

Podemos destacar entre métodos, para efeito de comparação com as aplicações que nosso sistema sugere, os seguintes:

- Método 4: Iluminação de superfícies rasa através de luz colimada.

Empregado na visualização de papéis, material têxtil, superfícies de metal usinadas e pinturas. Utiliza uma fonte de

SISTEMA ÓPTICO USADO EM INSPEÇÃO VISUAL.

FIG. 2.2

luz pontual, lentes e uma câmera tipo vidicon. A Fig. 2.3 ilustra este método

- Método 5: Visualização de irregularidades em superfícies.

Utiliza câmeras de varredura linear realizando triangulação para geração da imagem a ser digitalizada. O objeto desloca-se em uma direção enquanto a varredura da câmera é realizada no sentido perpendicular a esta, conforme mostra a Fig.2.4.

- Método 30: Visualização de superfícies planas refletoras.

Utiliza duas ou mais fontes de luz ou um anel luminoso de fibra óptica para evitar que o reflexo da câmera confunda a medida. A inspeção em superfícies metálicas polidas está nesta classe e apresenta grandes dificuldades para obtenção da imagem. A Fig. 2.5. ilustra este método.

- Métodos 33: Varredura radial de um objeto montado em uma mesa rotatória.

Próprio para inspecionar partes circulares. Utiliza uma câmera de varredura linear e o outro eixo é dado pela rotação da mesa. A Fig. 2.6. ilustra este processo, onde uma peça é inspecionada superficialmente, podendo ser aplicado à visualização de defeitos ou classificação das partes através de detecção das bordas do objeto.

- Método 34: Aquisição de imagem em esteira rolante.

Utiliza uma câmera de varredura linear e segundo eixo é fornecido pelo deslocamento do objetivo pela esteira. É o método mais comum e mais popular conforme mostra a Fig. 2.7.

- Método 46: Para ressaltar trincas. Consiste em magnetizar

VARREDURA RADIAL PARA INSPEÇÃO VISUAL
FIG. 2.6

INSPEÇÃO EM ESTEIRA ROLANTE
FIG. 2.7

DETECÇÃO DE BORDAS E CANTOS
FIG. 2.8

a peça sob inspeção, e aplicar tinta ou pó magneto-fluorescente, filtrar para eliminar ultra-violeta e digitalizar a imagem através de uma câmera tipo vidicon.

- Método 48: Obter informação de bordas de objetos com cantos vivos. Utiliza uma luz colimada em apenas uma direção. Detecta cantos, degraus, bordas, etc... conforme mostra a Fig. 2.8.

De todos os métodos, segue-se a demonstração de que cada é um caso que deve ser encarado de maneira particular visando a otimização e a redução dos custos de implantação, operação e manutenção.

Todos os sistemas de inspeção visual, necessitam trabalhar sobre uma imagem digitalizada bidimensional. Para isto, utilizá-se de uma câmera tipo vidicon que gera esta imagem sem nenhuma necessidade de varredura estra, ou utilizam-se câmeras lineares onde o objetivo é deslocado em uma das direções ou como sugere-se no trabalho, o uso de um sensor pontual com o objeto deslocando-se nas duas direções (x-Y) para a geração da imagem a ser inspecionada. Se este sistema de deslocamento possuir velocidade compatível e alta precisão, ter-se-á um novo método de grande valia na inspeção de peças mecânicas em sistemas de produção ou linhas de montagem industriais.

INSPEÇÃO DE SUPERFÍCIE RUGOSA
FIG. 2.3

VISUALIZAÇÃO DE IRREGULARIDADES
EM SUPERFÍCIE
FIG. 2.4

VISUALIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE ESPECULARES
FIG. 2.5

2.3. MICRODENSITÔMETROS

2.3.1. - Definição e estrutura de um digitalizador

(Microdensitômetro)

Na literatura, um digitalizador é definido por K. R. Castleman ([Ca 79]) como sendo um dispositivo capaz de dividir a imagem em pixels (elementos de imagem), endereçar cada um individualmente, medir os níveis de cinza em cada pixel, quantizar a medição contínua produzindo um número inteiro, e copiar o conjunto de inteiros em um dispositivo armazenador de dados.

Para executar tal processamento, o digitalizador radiológico deve ter uma estrutura global formada pelas seguintes partes:

(1) um sistema óptico que emite um feixe de luz sobre o filme para que, através da relação luz incidente/luz transmitida seja lida a densidade óptica de cada ponto; a densidade "D" corresponde ao enegrecimento do filme - é devinida como o logaritmo da razão entre a intensidade de luz incidente I_0 pela transmitida I , [$D = \log (I_0/I)$]; o foco de luz é responsável pelo tamanho do elemento de imagem;

(2) Circuitos eletrônicos que tratam aquele sinal analógico e o transformam em um sinal digital que então deve ser gravado na memória do microcomputador.

(3) Um sistema mecânico que proporciona o deslocamento do filme sob o feixe de luz, para que todos os elementos de imagem

possam ter lidas suas densidades ópticas. Nesta estágio o sistema de varredura de filme de ter, para não colocar em risco o projeto, um deslocamento com alta precisão e, com isso, a porcentagem de erro causada por eventuais folgas deve ser muito pequena. Além disso, quanto menor for o valor métrico de deslocamento entre duas leituras sucessivas, requerido pela frequência de amostragem, maior será o peso nos resultados obtidos.

Além da precisão dos deslocamentos realizados no filme radiológico, o sistema de varredura deve apresentar uma grande precisão geométrica. Tal precisão deve ser garantida para que a matriz de dados obtida tenha sempre a mesma distância entre pontos de colunas e linhas que a formam. Caso isso não ocorra, a matriz-imagem resultante não poderá trazer informações aceitáveis

Para que as precisões geométricas e de deslocamento possam ser garantidas o digitalizador necessita de um sistema de controle que ajuste o posicionamento do sistema de varredura. Desse modo, um microdensitômetro pode ser dividido, segundo [Ca 79], em 8 módulos:

1. Sistema óptico que ilumina o filme;
2. Sistema de detector que capta a luz que atravessa o filme;
3. Sistema de aquisição de dados que transforma a luz recebida pelo transdutor num sinal digital de 8 bits e realiza a inter fase com o microcomputador;
4. Sistema que proporciona o deslocamento ;

5. Sistema de controle que verifica se o deslocamento corresponde à posição programada nas coordenadas x-y;

6. Sistema que corrige o posicionamento, se necessário;

7. Sistema que habilita a leitura quando a mesa esta no ponto programado, e armazena os dados binários lidos;

8. Mesa de coordenadas com suporte para filme e sistema mecânico para deslocamentos lineares de 25 micrômetros.

Entretanto, se para [Ca 79] cada "pixel" pode ser convertido em 256 níveis de cinza (8 bits), para S. Montouri ([Mo 80]), a capacidade de armazenamento requerida para uma imagem na forma digital de média a alta resolução é maior (da ordem de 10^9 a 10^{10} bits, ou mais).

Dessa forma, para sistemas convencionais de digitalização de imagem, torna-se impraticável o uso de um dispositivo de armazenamento para muitas imagens.

Uma alternativa viável sugerida por [Mo 80] para digitalizar e armazenar quadros inteiros de imagem é fazer a varredura destes quadros, digitalizá-los e, temporariamente, armazenar as seções requeridas quando assim o for necessário para um processamento digital. Usando-se esta alternativa, elimina-se a necessidade de um armazenamento magnético permanente, desde que a imagem na forma de fotografia ou chapa de raios-x sirva como uma grande memória ROM (memória somente de leitura).

G. Nagy ([Na 83]) complementa o estudo de Castleman ([Ca79]) dividindo os modos de varredura em três tipos: o primeiro movendo o ponto de luz de "pixel" em "pixel" e medindo o valor inteiro refletido ou transmitido; o segundo, iluminando a imagem total e

observando a luz transmitida ou refletida de um elemento de imagem por vez; e o terceiro, utilizando varredores construídos com o campo de iluminação e o detector de luz restringidos por uma abertura.

O objeto é iluminado por um foco móvel e mostrado através de uma abertura móvel que segue o foco. Tal sistema reduz efeitos de ofuscamento. A complexidade desse modo de varredura no entanto, particularmente no rastreamento do feixe de luz com o ponto de amostragem, tem limitado suas aplicações para os densitômetros de alta precisão. Geralmente estes digitalizadores são chamados de Microdensitômetros.

Enquanto [Ca 79] utiliza transdutor para converter intensidade de luz em sinal elétrico, [Na 83] ressalva que apesar da amplitude do sinal elétrico ser idealmente proporcional à intensidade de luz, todos os detectores tem fisicamente um limiar na região escura, abaixo do qual nenhum sinal mensurável é gerado, e um limiar de saturação acima do qual incrementos posteriores de luz não produzem incrementos no sinal elétrico.

A relação entre a amplitude do sinal elétrico e a intensidade de luz geralmente é não linear, mesmo na faixa de trabalho do dispositivo. Na Fig. 2.9, são esquematizadas as inter-relações entre os vários componentes de um digitalizador de imagens conforme exposto em [Na 83].

2.3.2. Características de um digitalizador de imagem e requisitos funcionais

COMPONENTES DE UM DIGITALIZADOR

FIG. 2.9

Segundo [Ca 79], as duas características mais importantes de um digitalizador de imagens, são o tamanho da fenda de amostragem e o espaçamento entre "pixels" adjacentes. Já para Montouri em [Mo 80], os requisitos críticos impostos a um sistema de varredura para aplicações em mapeamento digital de imagens são: a resolução, ou seja, o número total de elementos visíveis por área varrida; a uniformidade de desempenho sobre a área de exploração; a precisão geométrica, a precisão fotométrica; a velocidade de varredura e o custo.

Os requisitos funcionais dos varredores de imagem são divididos por [Mo 80] em: medir as coordenadas, focalizar pontos de referência da imagem, digitalizar a área de exploração, e na saída do sistema, obter imagens e coordenadas na forma digital.

Digitalizar a parte da imagem em questão é o mais demorado dos itens. tem-se associada a esta função as etapas de localização, posicionamento e amostragem da área de exploração assim como conversão da densidade óptica da imagem em um número digital. O conjunto completo destes requisitos estão ilustrados na Fig.2.10.

2.3.3. Classificação dos varredores de imagens

Os varredores de imagens podem ser agrupados de acordo com J.S. Montuori em [Mo 80] e B. Nagy em [Na 83] em três grupos: varredores de imagens eletrônicos, eletro-ópticos e de estado sólido.

Dois grandes grupos de varredores baseiam-se na deflexão eletromagnética ou eletrotástica de um feixe de elétrons. Para Castleman ([Ca 79]), Montouri ([Mo 80]) e Nagy ([Na 83]), o primeiro tipo é o varredor com Tubo de Raios Catódicos (CRT), em que o foco gerado por um feixe de elétrons que se choca contra uma tela de fósforo é focalizado na imagem e a luz refletida ou transmitida é coletada e quantizada. A resposta é proporcional a densidade óptica da porção da imagem selecionada pelo posicionamento do foco proveniente da tela de fósforo.

Para [Na 83], um varredor CRT é capaz de endereçar mais de 4000 x 4000 elementos de imagem sem sobreposição. Entretanto, uma amostragem acima de 1000 x 1000 elementos requer sofisticados mecanismos de correção, incluindo controle dinâmico do foco e linearização da deflexão. A linearidade fotométrica do dispositivo CRT é inerentemente baixa e não uniforme sobre o campo de varredura. Acrescentam U. W. Arndt et al em [Ar 69], que a maior limitação de varredores CRT deriva do tamanho e forma do foco de luz.

O segundo maior tipo de varredor eletrônico é o de câmera de televisão, como as câmeras Vidicon, em que a luz refletida ou transmitida através de uma imagem em filme atinge a placa fotocondutiva é feita com uma folha de óxido de chumbo, e as Silicon Diode Vidicon, com película fotocondutora de silício, ambas com funcionamento semelhante a Vidicon padrão. e as Orthicon, que oferecem um padrão de varredura mais flexível. Também nessa classificação, existem os tubos Dissector, que, na realidade, são um

fotomultiplicador com uma pequena área fotocatódica movida eletronicamente.

Entre os varredores eletro-ópticos, que utilizam lasers, diodos emissores de luz (LEDS) e lampadas incandescentes como fontes de iluminação, existem duas categorias: sistemas com deflexão acústico-óptico de feixe e varreduras com técnicas mecânicas de deflexão de feixe.

Os dispositivos acústicos-ópticos tem uma varredura unidimensional limitadas de 1000 a 2000 "pixels" por linha. Resoluções mais altas têm sido obtidas empregando-se técnicas que incorporam dois dispositivos acústicos-ópticos, ou seja, um defletor de feixe trabalhando em série com um sistema de lentes movidas por ondas acústicas, nas quais são projetadas pelos defletores acústicos-ópticos aproximadamente 1000 pontos de luz. O dispositivo de lentes é movido por um pulso eletrônico apropriado para causar uma variação no índice de refração, no meio acústico. A aproximação das lentes então, reduz o tamanho do foco de luz. Assim, o feixe a laser movido pelo primeiro defletor é sincronizado com o movimento das ondas acústicas para varrer os focos de luz.

Uma das configurações mais simples de varredores mecânicos usa tambor rotatório. Este sistema é descrito por C.E. Nockolds et al em [No 70], por Sandor em [Sa 74] e por Abrahamsson em [Ab 66] onde a fonte de luz é focalizada por uma lente de alta qualidade, tal uma objetiva de microscópio, em cima do material a ser varrido ou exposto e o filme é colocado em volta de um tambor transparente que gira sobre seu eixo. A varredura na outra direção é completada pela translação do conjunto fonte de luz-lentes,

paralelamente ao eixo do tambor.

Este tipo de sistema pode provir alta resolução de varreduras sobre imagens grandes. Desde que não se necessite defletir o feixe de luz de seu eixo óptico, o tamanho máximo do foco é limitado somente pelo comprimento de onda de luz da fonte e qualidade da óptica usada.

A limitação deste tipo de dispositivos é a taxa de dados que pode ser manipulada, enquanto se faz o controle da velocidade com exatidão e estabilidade dimensional.

Outro sistema de varredura mecânica, do tipo de mesa de coordenadas X-Y, é descrito por M.E. Grandy et al em [Gr 82], M. Schleusener et al em [Sc 81], além de [Ar 69] e [Mo 80]. Este tipo de dispositivo é geralmente mais lento que os de tambor rotatório, mas podem acondicionar os filmes com maior flexibilidade.

Usualmente os varredores com mesa de coordenadas planas têm um sistema óptico estacionário no meio do qual o plano de imagem é movido nas duas direções ortogonais. O filme é montado em uma placa plana de vidro que faz o movimento ortogonal, operando em uma taxa de incremento muito pequena (menor do que 1 micrômetro) devido ao plano horizontal e a vagarosa taxa de dados recebidos da varredura.

As maiores vantagens do sistema de mesa plana, segundo Montouri [Mo 80] são: alta precisão de posicionamento (dentro de poucos micrômetros sobre vários centímetros), e excelente resolução espacial, tipicamente muitas centenas de linhas por milímetro

A última categoria nos varredores mecânicos é a dos sistemas que utilizam espelho multifacetado rotacional ou um espelho plano oscilatório para mover o feixe de luz por uma amostra do filme.

O feixe de luz pode ser refletido por um espelho que está acoplado a um motor de galvanômetro, sendo a deflexão ocasionada pela passagem de corrente elétrica do motor. Um outro método para desviar o feixe de luz é utilizar um dispositivo com prisma multifacetado rotacionado por um motor. Em ambos os casos o movimento do espelho causa a varredura do foco na superfície da imagem.

Os varredores com espelho móveis estão sujeitos a distorção geométrica da imagem varrida. O deslocamento linear do foco de varredura é proporcional à tangente do ângulo de deflexão do espelho. Para o prisma multifacetado, este incrementa linearmente com o tempo. No galvanômetro, a deflexão angular é linear com a corrente, que por sua vez é facilmente gerada linearmente com o tempo e o sinal luminoso é mais comumente amostrado em intervalos de tempos. Isto produz espaçamento de "pixels" não uniforme resultando distorção crescentes quando a imagem é apresentada. Este tipo de distorção deve ser completamente eliminada em técnicas de amostragem não uniformes.

O rápido desenvolvimento de dispositivos com elementos fotodetectores discretos tem originado uma variedade de sistemas de varredura de estado-sólido. Nestes tipos de varredores, ao invés de varrer mecânica ou eletronicamente um feixe de luz através de uma área de interesse, a região é amostrada em pequenas e discre-

tas áreas adjacentes por interrupção eletrônica entre detectores de um dispositivo. Portanto, sistemas com um número suficiente de elementos para cobrir a área de interesse, na resolução desejada, permitem a varredura sem qualquer movimento de regiões ou partes.

Um sensor de imagem de estado sólido consiste em uma estrutura integrada contendo um dispositivo de elemento sensitivo no qual a luz incidente é absorvida e convertida em uma carga elétrica, um sistema de armazenamento de elementos (em correspondência com os sensores) no qual a carga é integrada e armazenada e um circuito de varredura para leitura da carga armazenada. O sensor e os elementos armazenadores podem ser fotodiodos ou uma camada de redução superficial induzida por uma tensão aplicada a eletrodos semi-transparentes de um material tal como silício policristalino.

O mecanismo de leitura pode ser um registrador de deslocamento digital que controla um conjunto multiplex de interruptor, para reiterar seqüencialmente a carga dos sensores numa linha de saída comum.

A variação de sensibilidade de um elemento a outro é da ordem de 1%; por isso, 64 níveis de cinza podem ser obtidos. A distância de centro a centro entre elementos adjacentes está na ordem de 25 μ m, mas uma resolução mais alta pode ser obtida por magnificação óptica. Um dispositivo com 2048 x 2048 elementos é capaz de varrer uma imagem inteira em 50 s.

2.3.4. Comparações entre os sistemas de varredura

Reproduzir-se aqui, para maior clareza quando as várias técnicas de varredura existentes e para comparar as capacidades dos sistemas, algumas tabelas levando em [Mo 80] e [Na 83], apresentando as características dos vários dispositivos de varredura.

Na tabela 2.II lista-se os requisitos dados por [Mo 80] de um varredor ideal. Na tabela 2.III mostra-se o tamanho da imagem e as capacidades de resolução das diversas tecnologias dos sistemas comerciais. Na tabela 2.IV, apresenta-se as precisões geométricas e fotométrica bem como a capacidade de leitura ("pixels"/segundo) dos varredores. A relação das características dos varredores comerciais, segundo [Na 83], encontram-se nas tabelas 2.V.a e 2.V.b.

TABELA 2.II - REQUISITOS PARA UM VARREDOR IDEAL

ACOMODAÇÃO DE FORMATO	
Modo de formato completo.....	Variável, acima de 230x230 mm
Modo de formato "janela.....	Variável, acima 2000x2000pixels
RESOLUÇÃO.....	Variável, de 20 a 100 lin/mm nos dois modos
Tamanho de foco de varredura....	Variável, de 5 a 25 micrômetro
Pixels por linha.....	46000 = 100 lin/mm
(Formato completo).....	9200 = 20 lin/mm
Linhas por varredura.....	de 9200 a 46000 como função da (Formato completo) resolução de entrada
TAXA DE DADOS.....	pelo menos 0,75 milhões de pí- xels/seg, ideal, 37 milhões de pixels/seg.
PRECISÃO GEOMÉTRICA.....	0,001 A 0,002%
FAIXA DINÂMICA.....	pelo menos 200:1 (0,2 - 2,5 uns. de densidade) (63,1 - 0,3116% transmissão)
PRECISÃO FOTOMÉTRICA	
Quantização 6 bits (min).....	1 un em 64 = $\pm 0,035D$ ou $\pm 0,98\% T$
8 bits desejáveis.....	1 un em 256 = $\pm 0,009D$ ou $\pm 0,25\% T$

TABELA 2.III - ACOMODAÇÃO DE FORMATO E CAPACIDADES DE RESOLUÇÃO

TECNOLOGIA	MÁXIMO PIXELS/ LINHA	MÁXIMO VARREDORES DE JANELA COM 1000 (Lin/mm)	RESOLUÇÃO APROXIMADA COM FORMATO COMPLETO C/ UNIDADE SIN- GULAR(L/mm)	UNIDADE OU SEGMENTO NECESSÁRIO P/FORMATO COMPLETO P/ VARREDORES DE LINHA (Lin/mm)	C O M E N T A
ELETRÔNICO					
-CRT	4000	20mmx20mm	9	12	A
-Vidicom	2000	10mmx10mm	4	23	
-imagem dissector	4000	20mmx20mm	9	12	
ELETRO-ÓPTICO					
-tambor rotatório	6000	formato comp	100	1	B
-mesa plana	6000	formato comp	100	1	C
-espelho oscilatório	2000- 0000 (*)	10mm x 10mm (1000 pixels	22	5	D
-espelho rotatório	6000	formato comp	100	1	E
ESTADO SÓLIDO					
dispositivos lineares	2000	10mm x 10mm	4	23	G
dispositivos de área		(500 x 500) 2,5mmx2,5mm			

(*) - Varia com o tipo de espelho e taxa de varredura.

A - Adequado para janela com translação de estados precisos, baixa taxa, posicionamento não preciso da janela.

B - Capacidade para formato completo e janela, ineficiente em modo janela, baixa taxa, posicionamento não preciso da janela.

C - Capacidade para formato completo e baixa taxa

D - Modo janela com translação de estado, baixa resolução e linearidade.

E - Formato completo e janela, ineficiente em modo janela.

F - Alta taxa de dados para formato completo e janela e precisão no posicionamento.

G - Satisfazem os requisitos de janela.

TABELA 2.IV - PRECISÃO GEOMÉTRICA, FOTOMÉTRICA E CAPACIDADE DE TAXA DE DADOS

TECNOLOGIA	PRECISÃO GEOMÉTRICA	PRECISÃO FOTOMÉTRICA	TAXA DE DADOS (pix/seg)
CRT	0,05 %	0,02 D	5×10^6
VIDICON	0,02 %	0,02 D	8×10^6
DISSECTOR	1,2 %	0,02 D	1×10^5
TAMB. ROT.	0,002 %	< 0,01 D	$1,5 \times 10^5$
MESA PLANA	0,002 %	< 0,01 D	4×10^4
ESP.OSCIL.	0,01 %	< 0,01 D	1×10^6
ESP.ROT.	0,002 %	< 0,01 D	1×10^8
ESTADO SÓLIDO			
Disp.Linea	0,002 %	< 0,01 D	$9,2 \times 10^8$
Disp. Área	0,1 um	< 0,01 D	5×10^6

TABELA 2.V.a - CARACTERISTICAS DOS VARREDORES COMERCIAIS

TIPO	FORMATO	GRADE DE AMOSTRA	TAMANHO DO FOCO	GRAUS DE CINZA
CAMERA TV vidicon plumbicon dissector est-sólido	variável	256x256 a 2000 x 2000	variável	16 - 256
CRT foco-flut.	variável	64 x 64 a 4000 x 4000	10 um na face do CRT	64 - 256
DISPOSITIVO LINEAR INTEGRADO	15 mm	4000 x 1	10 um	2 - 64
DISPOSITIVO 2-D INTEGRADO	10 x 10mm	256 x 256	40 um	2 - 64
PRISMA DE ESPELHO ROTATÓRIO	variável	2000 x 2000a 10000x10000	50 um	16
DISPOSITIVO DE FIBRA LINEAR	100 cm	10000 x 1	100 um	2
TAMB. ROT.	100x100 cm	50000x50000	5-100 u	256
MESA PLANA	100x100 cm	50000x50000	1-100 u	4096

TABELA 2.V.b. - CARACTERISTICAS DOS VARREDORES COMERCIAIS

TIPO	UNIFORMIDADE FOTOMÉTRICA%	PRECISÃO GEOMÉTRICA %	PREÇO (US\$)	APLICAÇÕES
CAMERA TV vidicon plumbicon dissector est.-sólido	3 - 10	2	1000 a 25000	inspeção biomédica, visão de robô
CRT foco flut.	0,5	0,5	10000 a 100000	varredores de filmes
DISPOSITIVO LINEAR	3	0,1	1000	facsimile OCR
DISPOSITIVO 2-D INTEGRADO	3	0,1	5000	OCR
PRISMA DE ESPELHO ROTATÓRIO	5	0,1	25000	OCR e facsimile
DISPOSITIVO E FIBRA LINEAR	N/A	0,1	50000	projetos de engenharia
TAMB. ROT.	0,1	0,01	50000 250000	fotos e ma pas aéreas publicidade
MESA PLANA	0,01	0,001	25000 a 10000	instrumen- tação de laboratório fotos e ma pas aéreas

2.4. TIPOS DE MICRODENSITÔMETROS COMERCIAIS OU ENCONTRADOS NA LITERATURA CIENTÍFICA.

2.4.1. Sistemas varredores com tubos de raios catódicos

Arndt, Crowther e Mallett, em [Ar 68], além de apresentarem os requisitos fundamentais dos microdensitrômetro para determinação de estruturas cristalinas, construíram um sistema com feixe duplo no qual a fonte de luz era um tubo de raios catódicos (T.R.C.) de alta resolução, cujos requisitos fundamentais eram:

(a) o instrumento deveria poder medir a intensidade de difração de um ponto focal em aproximadamente um segundo;

(b) os resultados das medições deveriam ser apresentados em uma forma adequada para futuro processamento no computador;

(c) o instrumento deveria poder medir a intensidade dos focos integrados, que era traduzida numa quantidade proporcional à integral da diferença entre a densidade óptica do filme dentro do foco e a densidade da região vizinha a este ponto focal;

(d) o sistema deveria ser versátil, podendo assim medir o padrão de difração obtida em qualquer câmera do raio-X.

Arndt, Crowther e Mallett apresentaram também as principais partes do microdensitrômetro proposto: um T.R.C. de alta resolução do tipo Ferranti 5/71-AO como fonte de luz com deflexão e focalização magnética; lentes objetivas que focalizarem a luz do tubo no filme (como a área útil do tubo era de 5 x 5 cm., com magnificação óptica de 2,5 vezes, tinha-se uma área de 12,5 cm de diâmetro no filme); lentes de 15 cm. de diâmetro que captavam a

luz atravessam o filme: e uma fotomultiplicadora do tipo EMI 9524S, sobre a qual era mostrada aquela luz. Neste sistema, parte da luz focada no filme era coletada por outra fotomultiplicadora via reflexão de espelho para uma monitoração do feixe no T.R.C. Tal monitoração era necessária por causa da instabilidade na intensidade da luz fornecida pelo tubo. As escalas de densidade óptica do sistema podiam ser de 1D ou de 0 a 2D, mas a densidade óptica máxima que conseguia ser medida com precisão girava em torno de 1D.

Para resolver o problema de limitação da densidade óptica medida gerado pelo uso de um T.R.C. tipo Ferranti linha 71, Brooks, Daavey, e Willder em [Br 70], propuseram um tubo de raios catódicos com feixe tipo retangular obtendo um foco sem halo de dimensões de $1000 \times 16 \text{ um.}$, utilizando lentes eletromagnéticas colocadas dentro do canhão do tubo de raios catódicos.

2.4.2. Sistemas varredores com mesa plana

Arndt et al ([Ar 69]) forneceram uma retrospectiva do sistema proposto em [Ar 68] e apontaram as desvantagens de se utilizar um T.R.C. como fonte de luz. O maior problema observado foi a halo existente ao redor do foco na tela de fósforo do tubo e qual continha cerca de 1% da intensidade total de luz do foco, que limitava a densidade óptica lida com precisão no valor máximo de 1D. Assim, os autores apresentaram um novo sistema, mais lento, mas muito preciso e de foco pequeno.

O sistema descrito era microdensitômetro tendo como fonte de

luz o sistema óptico de um microscópio comercial do tipo Nikon 6CT adaptado a uma mesa de coordenadas acionada por motores de passos (Mullard AU 5105/80). Cada incremento do filme tinha um valor de 20.83. e uma precisão de 5 um. em 15cm. de deslocamento total, referente às duas direções, X e Y. A luz era projetada no filme através de um conjunto de lentes e, após passar por este, era captada por uma fotomultiplicadora. O sinal desta fotomultiplicadora era convertido em um número binário de 12 bits, ou 4096 níveis de cinza, por um conversor analógico-digital logarítmico, como tempo de conversão de 20 ms. O microdensitômetro era totalmente programável e a linearidade da resposta do instrumento estava dentro de 1% numa faixa de 1,8 unidades óptica que poderia ser estendida a uma faixa de 0 a 4D, variando-se o brilho da lâmpada.

Um sistema que é uma combinação de dois tipos de varredores, um tubo de raios catódicos associado à uma mesa de coordenadas, foi descrito por Mallett et al em ([Ma 77]), sendo o microdensitômetro também controlado por computador. O instrumento foi utilizado rotineiramente para varrer fotografias de macromoléculas biológicas. Neste varredor, o filme montado em um cassete especial, foi acomodado com precisão na parte mecânica. Esta parte mecânica pôde ser movida em incrementos de 20 um. através de dois motores de passo IMPEX PD16 de 8 fases, controlados por um computador PDP 11-40 para o movimento em X e Y.

Como fonte de luz foi utilizado um tubo de raios catódicos tipo Ferranti 13G75 com tela de 104 mm. de diâmetro, ângulo de

desvio total 40° e diâmetro do ponto focal de aproximadamente 15 μm . A tela fosfórica tipo Ferranti A5 tinha a máxima emissão de energia na faixa de 530 nm. A luz do T.R.C. era focalizada no filme por uma lente objetiva com redução de 2:1, resultando num ponto focal de 35 μm . no filme o qual era posicionado em incrementos de 5 μm . A luz do filme era focalizada por outra lente de 89 mm. no fotocatodo de uma fotomultiplicadora.

A tensão de saída da fotomultiplicadora seguia para um circuito amostrador e depois para um amplificador logarítmico. Este sinal analógico era então convertido em sinal digital de 10 bits pelo conversor da Analog Device ADC 10QS.

Este equipamento ainda utilizava duas outras fotomultiplicadoras com a função de monitorar a luz incidente no filme. Para tanto, ambas recebiam uma parte da luz incidente e, através de um circuito de controle no T.R.C., faziam a correção da não uniformidade do fósforo e da dependência da saída de luz com o tempo. Fazendo-se estas correções, a variação máxima entre pontos extremos na face do T.R.C. era de 0,03 unidades de densidade óptica.

Para tal sistema, foi testada a reprodutibilidade de posicionamento a partir da medida da distância de 4 pontos de referência colocados equidistantes ao redor de um círculo de 50 mm. de raio. O centro da intensidade de cada foi medido várias vezes e o resultado acusou variações menores que 10 μm ., demonstrando assim ser um instrumento preciso. A faixa de densidade óptica que pôde ser medida com linearidade e precisão

situou-se entre 0 a 1,2D.

Em valores de baixa densidade óptica ruído do instrumento foi de cerca de $\pm 0,014$ unidades de densidade óptica, equivalente a $\pm 3\%$ de intensidade de luz. Já para o valor 1D o desvio padrão foi de 0,07 unidades de densidade óptica. Para os autores ([Ma 77]), o microdensitômetro híbrido mostrou, pelo período de 3 anos, possuir bom desempenho e baixa taxa de manutenção.

Para evitar problemas de focalização e reduzir a dispersão de luz, Johansson, Palm, e Werner, em [Jo 80], apresentaram um microdensitômetro controlado por computador, para uso em medição Guinier de difração granular fotográfica, onde não utilizaram componentes ópticos, tais como lentes, espelhos e prismas.

A unidade de leitura consistia de um diodo emissor de infravermelho (com comprimento de onda de 940 nm, $I = 250$ mA e $V = 1,35$ V), um sistema colimador e um fotodiodo. O colimador de 5 mm. de comprimento possuía uma janela de 0,040 x 2,000 mm., e estava posicionado entre o diodo emissor e o filme. Outro colimador de 17 mm. de comprimento e de mesma janela era posicionado após o filme, na região da luz transmitida e anteposto ao fotodiodo cuja eficiência era de 0,92 elétrons por quantum.

Em operação, a movimentação do filme e do seu respectivo suporte era feita por um motor AC síncrono via um sistema de engrenagens e rosca-sem-fim, com velocidade de varredura de 2 mm/s. A corrente do fotodiodo era convertida num sinal analógico de tensão e amplificada em um pré-amplificador com fator de ganho

8
igual a 8×10 . Depois, este sinal passava por um amplificador de ganho programável (APG), controlado digitalmente, com oito níveis de ganhos binários compreendidos entre $G = 2^0$ a $G = 2^7$. Após ser amplificado pelo APG, o sinal analógico era convertido no computador para a forma digital e os dados eram armazenados em disco flexível.

Esses mesmos pesquisadores trabalharam anteriormente com um sistema de tambor giratório, mas devido a coleta de dados de uma fotografia Guinier ser essencialmente linear, o uso destes aparelho tornou-se muito complicado. Para tanto projetaram e construíram o sistema descrito e concluíram que a contribuição de ruído do sistema opto-eletrônico era desprezível em face ao ruído inerente de qualquer fotografia de Guinier.

Um sistema de microdensitômetro diferente, descrito por Cardoso & Caticha-Ellis, em [Cr 79], utiliza um feixe de raios-X monocromáticos ao invés de luz. Nele, as medições baseavam-se na absorção de raios-X pela prata precipitada nas imagens dos filmes. Existem três colimadores no sistema descrito no trabalho. Um deles colima o feixe de raios-X no cristal e outros dois móveis colimam o feixe monocromático que deixa o cristal na superfície do filme. O diâmetro destes "pinholes" situava-se entre 50 a 200 μm ., sendo que os dois últimos estavam separados de 130 mm. A construção mecânica que movimentava os "pinholes" para uma posição exata a fim de obter um feixe de distribuição de intensidade uniforme tinha precisão de 1 μm .

O feixe transmitido pelo filme era então captado por um

detector de radiação. O filme era movido pela mesa de coordenadas manualmente na vertical e automaticamente na horizontal com uma velocidade linear de 1/4 a 2mm. por minuto.

Em [Cr 79] observsa-se ainda que a baixa velocidade do sistema poderia ser uma desvantagem em relação aos sistemas com feixe de luz, mas isto só seria realmente significativo caso o laboratório necessitasse de altas taxas de varredura.

Schleusener, Thoms, e Fiedler também descreveram em [Sc 81] um sistema de microdensitômetro baseado no princípio de varredura por meio de uma mesa de coordenadas. Para a construção da parte óptica do instrumento foram utilizadas partes de três microscópios de pesquisa do tipo AMPLIVAL, EPIVAL e VERTICAL e como fonte de luz, lâmpadas halogênicas e de tungstênio de 50, 100 e 150 W. Usando-se um estabilizador de tensão, conseguiu-se um feixe de luz constante com uma pequena flutuação de 0,1% na corrente de alimentação. Um conjunto de lentes localizava o feixe de luz na superfície do filme que estava preso à mesa de coordenadas. Com este conjunto de lentes pôde-se selecionar o tamanho do foco no filme e com um outro conjunto conseguiu-se aumentar a imagem em estudo. O colimador de luz pôde ser ajustado de 0,01 a 3,00 mm.

A mesa de coordenadas era movida à frente do sistema óptico por um motor de passo tipo IPS acoplado a uma rosca-sem-fim de alta precisão. O incremento mínimo conseguido com este motor era de 2 μ m. de movimento de mesa. A velocidade da mesa era controlada por um gerador de pulsos de frequência variada.

A luz advinda do filme era novamente focalizada por lentes numa fotomultiplicadora, cuja saída era então amplificada por um amplificador logarítimo e enviada a um conversor analógico-digital tipo DC-Digitalvoltmeter 61206 com precisão de 0,1% na digitalização. O sinal analógico também podia alimentar um registrador, visualizando-se graficamente o sinal.

Em 1982, Grandy, Sainz, e Coleman em ([Gr 82]) conseguiram uma grande precisão na movimentação do carro-filme, utilizando uma malha de realimentação baseada numa régua óptica. Apresentaram, assim, um densitômetro, computadorizado para análise de dados espectrográficos, modificando as configurações de um densitômetro comercial já existente em seu laboratório de pesquisas. O sistema consistia em uma mesa de coordenadas que, montada sobre um carro de transporte, era acionada por uma rosca-sem-fim de alta precisão através de um motor de passo. Este motor de passo recebia os sinais de controle de velocidade e direção de giro diretamente do computador ou por um controle remoto.

Para conseguir a precisão necessária no sistema de deslocamento da mesa, foi instalada uma régua óptica de codificação com incrementos de 0,0025 mm. Esta régua de quarto fornecia os pulsos em código BCD via-leitor óptico para o computador fazer a devida realimentação em malha fechado, atuando, dessa forma, no motor passo, e indicando um posicionamento axato da mesa com eliminação do posicionamento do carro por meio de interpolação indireta baseada na rotação da rosca-sem-fim.

A fonte de luz consistia de uma lâmpada de tungstênio que fornecia um feixe modulado em pulsos focalizados sobre uma fenda. Por último, a luz colimada pela fenda era focalizada sobre a emulsão fotográfica e, depois de passar por esta, era novamente focalizada numa fotomultiplicadora. O sinal de fotomultiplicadora, proporcional à densidade óptica, era então amplificado e colocado à entrada de um medidor digital de 3. 1/2 dígitos onde se visualizava o valor da densidade obtida.

Todo o sistema tinha com um computador do tipo microNOVA e um minicomputador tipo ECLIPSE/S130.

Em testes feitos para avaliar o comportamento da sistema quanto à precisão nas distâncias, encontraram, para uma seqüência de 10 medidas entre 2 linhas de 1,32842 mm (valor médio 0, um desvio-padrão no valor de 0,001524 mm.

Um densitômetro formado por uma mesa com movimento rotacional óptico com deslocamento linear é descrito por Van Loock, Van den Enden, e Geise, em [Lo 83]. A mesa é rotacionada por um motor de velocidade variável que, em condições normais, tem velocidade de 60rpm. O motor de passo transporta, por meio de um parafuso de precisão, a fonte de luz e a fotocélula, com incrementos de 0,2 mm. O sistema comercial utilizado é o ELSAN E-2500 e permite medir valores de densidade óptica entre 0 e 2D com boa relação sinal/ruído. O conversor analógico-digital AD 574KD converte 12 bits em 140 us., sendo os dados então gravados em fita magnética por meio do controle de um multivibrador monostável e por portas TTL. Todos os outros controles, no

sistema, são feitos por um microprocessador Z80.

Em [Lo 83] é fornecido o fluxograma do subprograma de sincronização da rotação da mesa com o movimento do sistema detector e a gravação dos dados na fita magnética. O sistema descrito é usado para recolher dados gravados em filme fotográfico de amostras de difração de fase de gases eletrônicos.

2.4.3. Sistemas varredores com tambor giratório

Vários sistemas varredores com tambor rotatório foram apresentados na literatura, a maioria baseada no trabalho de Abrahamsson ([Ab 66]), onde é descrito um aparelho desenvolvido para medir a intensidade integrada e coordenadas de reflexão em radiografias de cristais simples. Este aparelho constituía-se fundamentalmente de um varredor de tambor rotatório acoplado a um computador digital, sendo assim flexível no uso e de construção simples. Abrahamsson dividia o varredor em dois blocos: optomecânico e eletrônico. A parte opto-mecânica era constituída de:

- (a) um cassete cilindro com janela na qual era fixada o filme radiográfico;

- (b) um motor que rotacionava o cilindro com velocidade tangencial de 34,7 cm/s;

- (c) uma rosca-sem-fim que transladava o cilindro quando este estava em rotação a uma taxa de 144 μ s para 60 μ m. de translação;

- (d) um microscópio que gerava um feixe de luz, de secção retangular de 45 x 60 μ m., incidente no filme;

(e) um prisma de 90° que defletia o feixe de luz atravessando o filme para uma fotomultiplicadora.

Por seu lado, a parte eletrônica era formada por:

(a) uma fotomultiplicadora que convertia a luz num sinal elétrico;

(b) um amplificador do sinal proveniente da fotomultiplicadora;

(c) um conversor analógico-digital de bits com tempo de conversão de 50 μ s.;

(d) um computador que armazenava os dados recolhidos e controlava o funcionamento do varredor.

O esquema sintetizado em blocos desse sistema está ilustrado na figura 2.11

Xuong ([Xu 69]) propôs um dispositivo similar ao descrito por Abrahamsson, com maior precisão tanto no posicionamento do filme quanto na medição da densidade óptica. Seu sistema era formado por um tambor giratório com 5 polegadas de diâmetro, um conjunto composto pela fonte de luz, prisma de deflexão e uma fotomultiplicadora que se deslocava em incrementos paralelamente ao eixo do tambor, um codificador óptico e um computador.

Uma lâmpada de tungstênio emitia um feixe de luz de 1×1 mm., que passava pelo filme e era defletido de 90° para a fotomultiplicadora. O sinal desta fotomultiplicadora era amplificado por um amplificador logarítmico e convertido em 8 bits por um conversor analógico-digital.

A cada 100 um. de resolução no filme, o codificador mandava um pulso ao conversor, habilitando-o converter o sinal da fotomultiplicadora, sendo feitas 17800 amostragens por segundo. O computador usado era um IBM 1130. O instrumento pôde medir 256 níveis de cinza com uma precisão de ± 2 níveis numa faixa de densidade óptica de resposta linear de 0,6 a 2,2D. [Xu 69] concluiu que o sistema era capaz de varrer e medir radiografias com uma precisão comparável ao sistema de raios catódicos descrito por Arndt et al em [Ar 68], e superior a conseguida por um microdensitometro comercial do tipo não-integrador.

No trabalho de Nockolds & Krestsinger ([No 70]), a focalização do feixe de luz filme podia ser feita com 50, 100 ou 200 um. de diâmetro, a rotação do tambor em 1, 2 ou 4 revoluções por segundo, sendo que a luz transmitida era lida a cada 50, 100 ou 200 um. na direção da rotação. Para luz primária transmitida sem filme, o valor acusado era de OD. Para o nível máximo de valor, 255, o instrumento podia ser ajustado para os valores 2D ou 3D. Eles consideravam o sistema filme-densitômetro como linear até 1,9D. O erro apresentado era de 0,1% na direção de rotação e de 0,05% na de translação.

Considerando as vantagens dos varredores com T.R.C. (velocidade e flexibilidade) e as suas desvantagens comparados aos dos sistemas de tambor rotatório (precisão nas medidas acima de 1,2D, por exemplo), Matthews et al [Ma 72] propuseram um sistema consistindo de um microdensitômetro digital do tipo Photoscan modelo B interfaceado com um computador Varian 6201. O

(a)

FOCO FLUTUANTE

(b)

ABERTURA FLUTUANTE

SISTEMAS DE VARREDURA

FIG. 2.11

filme era montado num tambor de 360 mm. de raio, que executava 4 revoluções por segundo. Uma rosca-sem-fim transladava o sistema óptico formado pela fonte de luz e pelo fotodetector na direção axial do tambor. A rosca-sem-fim era rotacionada por um motor de passo onde cada incremento correspondia a 12,5 um. de passo no filme. No total eram 225 incrementos na rotação e na translação.

Era utilizado um conversor analógico-digital de 8 bits, que recebia pulsos de inicialização de um codificador em cada 50, 100 ou 200 um. de rotação. Cada duas conversões formavam uma palavra e dados convertidos em densidade óptica eram colocados no computador. A faixa de densidade óptica podia ser de 0 a 2D ou de 0 a 3D. As várias rotinas que comandavam o densitômetro eram copiadas na linguagem FORTRAN.

Este sistema era utilizada para medir a difração de raios-X armazenados em um filme fotográfico nos estudo cristalográficos de proteínas.

Finalmente, o sistema desenvolvido por Sandor & Cagliuso ([Sa 74]) usava varredura com tambor rotatório de alta qualidade com iluminação de lâmpadas de baixa voltagem, livre, portanto, das inconveniências de um sistema de foco flutuante. Como elemento conversor de luz utilizava uma fotomultiplicadora do tipo RCA 931A. O sinal desta fotomultiplicadora passava por um amplificador logarítimo que fornecia diretamente a densidade óptica. Os dados de densidade óptica, já amostrados, eram digitalizados em 8 bits (256 níveis) cobrindo uma faixa de 0 a 1,7D ou 2,2D. A velocidade do tambor era variável para que a taxa

de aquisição de dados de 28000 amostragens por segundo ficasse constante independente da quadriculação na varredura.

Após cada revolução do tambor, uma rosca-sem-fim fornecia um incremento de 25 micrômetros na sua direção axial. O instrumentos conseguia captar imagens acima de 20 x 25 cm. com resolução espacial máxima de 20 pares de linhas/mm.

2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Ab 66] - ABRAHAMSSON, S. Computer Controlled Film Scanner.
Journal of Scientific Instruments, 43: 931-933, 1966
- [Ag 80] - AGIN, G. L. Computer Vision Systems for Industrial
Inspection and Assembly. IEEE Computer 13 (5): 1120,
1980.
- [Ar 68] - ARNDT, U. W.; CROWTHER, R. A.; MALLETT, J.F. W. A
Computer-Linked Cathode-ray Tube Microdensitometer for
Scientific Instruments, 1: 510-516, 1968
- [Ar 69] - ARNDT, U. W.; LEIGH, J. B.; MALLETT, J. F. W.; TWINN,
K.E. A Mechanical Microdensitometer. Journal of
Scientific Instruments, 2: 385-387, 1969.
- [Ba 85] - Batchelor, B. G.; HILL, D. A.; HODGSON, D. C. Automated
Visual Inspection. IFS (Publications) Ltd., UK, North-
Holland, 1985.
- [Br 70] - BROOKS, C. B.; DAVEY, P. G.; WILLDER, S.S. An Improved
Micro-spot Cathode-ray Tube. Journal of Physics E:
Scientific Instruments, 3: 346-350, 1970.
- [Ca 79] - CASTLEMAN, K. R. Digital Image Processing. Prentice
Hall Signal Processing Series, Alan V. Oppenheim,
Series Editor, 1979.
- [Ch 82] - CHIN, R. T.; JARLOW, C. A. Automated Visual Inspection:
A Survey. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine
Intelligence 4 (6): 557-573, 1982.

- [Ch 86] - CHIN, R. T.; DYER, C. R. Model-based Recognition in Robot Vision. Computing Surveys 18 (1): 67-108, 1986
- [Cr 79] - CARDOSO, L. P. & CATICHA-ELLIS, S. An X-ray Microdensitometer, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 12: 545-548, 1979.
- [Fu 82] - FU, K - S. Pattern Recognition for Automatic Visual Inspection. IEEE Computer 15 (12): 34-40, 1982.
- [Go 80] - GOTO, N.; KONDO, T. An Automatic Inspection System for Printed Wiring Board Masks. Pattern Recognition, 12 (6): 443-455, 1980.
- [Go 82] - GONZALEZ, R. C.; SAFABAKHSH, R. Computer Vision Techniques for Industrial Applications and Robot Control. IEEE Computer 15 (12): 17-32, 1982.
- [Go 91] - GONZAGA, A. Tecnologia para o Reconhecimento do Formato de Objetos Tri-dimensionais. Tese de Doutorado, IFQSC-USP, Julho de 1991.
- [Gr 82] - GRANDY, M. E.; SAINZ, M. A.; COLEMAN, D. M. A. Computerized Research Microdensitometer for Spectrographic Data Analysis Applied Spectroscopy, 36 (6): 643-657, 1982.
- [Ja 80] - JARVIS, J. F. Visual Inspection Automation. IEEE Computer 13 (5): 32-39, 1980.
- [Ja 83] - JARVIS, R. A. A. Laser Time-of-Flight Range Scanner for Robotic Vision, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-5 (5): 505-512, 1983.

- [Jo 80] - JOHANSS, K. E.; PALM, T.; WERNER, P. E. An Automatic Microdensitometer for X-ray Powder Diffraction Photographs. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 13: 1289-1303, 1980.
- [Ke 86] - KENT, E. W.; SHNEIER, M. D. Eyes for Automatons. IEEE Spectrum: 37-45, 1986.
- [Kr 81] - KRUGER, R. P.; THOMPSON, W. B. A Technical and Economic Assessment of Computer Vision for Industrial Inspection and Robotic Assembly. Proc. IEEE 69 (12): 1524-1538, 1981.
- [Lo 83] - LOOK, J. F. V.; VAN DEN ENDEN, L.; GEISE, H. J. Microprocessor-controlled Densitometer for Electron Diffraction. Journal of Physics Instruments, 16: 255-257, 1983.
- [Ma 72] - MATTHEWS, B. W.; KLOPFENSTEIN, C. E.; COMMAN, P. M. A Computer Controlled Film Scanner for X-ray Crystallography. Journal of Physics Instruments, 5: 353-359, 1972.
- [Ma 77] - MALLETT, J. F. W.; CHAMPNESS, J. M.; FARUQI, A. R.; GOSSLING, T. H. A New Automatic Flat-bed Microdensitometer for Use in X-ray Crystallography. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 10: 351-358, 1977.
- [Mo 80] - MONTUORI, J. S. Image Scanner Technology. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 46 (1): 46-61, 1980.

- [Na 83] - NAGY, G. Optical Scanner Digitizer. IEEE-Computer: 13-24, May 1983.
- [No 70] - NOCKOLDS, C. E.; KRETSINGER, R. H. An Evaluation of a Rotating Drum Densitometer and its Application to Precession Photographs of Protein Crystals. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 3: 842-846, 1970.
- [Po 80] - PORTER, G. B.; MUNDY, J. L. Visual Inspection System Design. IEEE Computer 13 (5): 40-49, 1980.
- [Ra 87] - RAVICH, L. E. Intelligent Machine Vision Systems: Tools for the Factory of the Future. Laser Focus/Electro-Optics: 118-124, 1987.
- [Ri 84] - RIOUX, M. Laser Range Finder based on Synchronized Scanner. Applied Optics 23 (21): 3837-3844, 1984.
- [Sa 74] - SANDOR, T.; CAGLIUSO, G. Rotating Drum Scanner-display System for Digital Image Processing. Rev.Sci. Instrument., 45 (4): 506-509, 1974.
- [Sc 81] - SCHLEUSENER, M.; THOMS, W.; FIEDLER, H. Mikrodensitometer fuer Elektrofotografische Systeme. Feigeraetetechnik, 4: 167-170, 1981.
- [We 83] - WEST, P. C. Machine Vision in Practice. IEEE Trans. on Industry Applications IA-19 (5): 794-801, 1983.
- [Xu 69] - XUONG, N. An Automatic Scanning Densitometer and its Application to X-ray Crystallography. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 2 (2): 485-489, 1969.

- [Ya 77] - YACHIDA, M.; TSUJI, S. A versatile Machine Vision System for Complex Industrial Parts. IEEE Trans. on Computers C26 (9): 882-894, 1977.
- [Ya 80] - YACHIDA, M.; TSUJI, S. Industrial Computer Vision in Japan. IEEE Computer 13 (5): 50-63, 1980.

CAPITULO 3

A TECNOLOGIA DO CONTROLE ADAPTATIVO

3.1 - Considerações Iniciais.

As recentes pesquisas de trabalhos em controle adaptativo, baseiam-se na implementação de algoritmos existentes, na busca de formulação de novos algoritmos, e na procura por pontos pouco aprofundados na literatura técnica. A discussão que apresenta-se a seguir procura mostrar o estado da arte sobre controle adaptativo, discutindo resultados e tendências.

3.2 - Controladores Auto-Ajustáveis.

Tsay e Shieh em [TS 81] e Warnick em [WA 81c] propuseram controladores auto-ajustáveis no espaço de estados, os quais em ambos os casos utilizavam um projeto de controlador de alocação de pólos. Em [TS 81] supunham os estados usando um estimador de mínimos quadrados extendido e derivando os ganhos do estimador de estados dos termos do modelo de ruído. Warwich em [WA 81c] obteve uma estimativa de estados utilizando a aproximação do mínimos quadrados normais. Era impossível evitar suposição de estados e utilizar as técnicas de projeto de espaço de estados fazendo uso de sinais de entrada e saída. Hesketh em [HE 82] mostrou como formular um controlador (STC) multivariável apropriado, com valores de entrada e saída no vetor de estados. O

projeto de alocação de pólos resultante era simples e apresentava bom controle com convergencia rápida de parametros estimados.

Warnich em [WA 82a] obteve uma regra geral para propriedades "auto-ajustável" dos espaços de estados auto ajustáveis baseada em alocação de pólos, e mostrou que as estratégias anteriores eram casos especiais desta regra geral.

Warnich e Westcott em [WA 82b] sugeriram um auto-regulador que empregava uma entrada de controle dependente da realimentação de estado em combinação com a realimentação de saída linear, para obter um esquema de alocação de pólos com características adicionais. Eles consideraram as possibilidades de redução na variação de saída pela troca correta dos parametros associados à realimentação "extra". Neste esquema, em adição à seleção dos pólos de malha fechada, os parametros de realimentação de saída, deveriam também ser especificados anteriormente à operação do sistema, para minimizar o problema de ruído no sistema de saída. Isto tinha o efeito de mover os zeros de malhas fechada para posições alternativas. Eles discutiam algoritmo com duas propriedades ajustáveis:

- (1) Realimentação de estados por alocação de polos
- (2) Realimentação linear por otimização.

Simulações eram feitas usando um fator de redução de variável com valor inicial de 0,94 e uma janela de 100 amostras. Estudos de simulação mostravam o efeito dos parâmetros de realimentação de saída linear na variação da saída, sob diferentes condições. Um valor bastante melhorado de variação de

saída era obtido quando somente realimentação de estado era utilizado, embora ocorresse um aumento no tempo de cálculo. Foi proposto por Shieh em [SH 82] uma linha de espaço de estados para STC de uma classe de sistema estocásticos multivariáveis, tendo o mesmo número de entradas e saídas. Um controlador multivariável realimentado a estado, baseado no conceito de alocação de pólos, foi desenvolvido. Esse STC multivariável poderia aplicado a sistemas lineares multivariáveis invariantes no tempo, instáveis ou estáveis, fase-mínima/fase-nao mínima. Eles também apresentavam um auto-regulador com ordem reduzida e também outro com mínima variação realimentado a estado, extendendo a linha de espaço de estados de Tsay e Shieh em [TS 81]. A linha proposta tinha as vantagens de simplicidade e flexibilidade, as quais facilitaram as aplicações práticas de STC a sistemas reais.

3.3 - STC Com Variação Forçada

O STC (regulador auto-ajustável) com mínima variação tem sido largamente aplicado a uma variedade de processos industriais. Contudo, na prática existem situações que requerem grandes sinais de controle. Casos semelhantes são formulados como problemas de controle LQG ("Linear Quadratic Gaussian").

Em tais projetos, os pesos na função de perda quadrática são usados como variáveis de projeto, que afetam a resposta em malha fechada. Pode ser difícil para um projetista selecionar valores apropriados para os pesos. Na prática, é mais fácil selecionar um

"valor forçado" na variação da entrada.

Toivonen [TO 83a] propôs um STC com variação forçada semelhante, onde os pesos são ajustados "on-line" até que o desempenho do controle fosse obtido. Neste método, uma restrição explícita era utilizada na variação de entrada. Tem-se que minimizar a variação estacionária da saída, sujeita a restrição de que a variação de entrada fosse menor ou igual ao valor forçado pré-determinado. Isto tornava-se um problema de controle quadrático linear onde o peso na entrada poderia ser visto como um multiplicador de Lagrange.

O STC com variação forçada utilizava identificação "on-line" para estimar os parâmetros de um modelo de processos estocásticos linear. A cada instante amostrado, a estratégia de controle era encontrada para resolver um problema de controle quadrático linear. O peso na entrada na função de perda quadrática era ajustado para cada intervalo amostrado usando o esquema Robbins-Monro. A solução do problema "variação forçada" implicava em uma solução para uma equação de Riccati em regime permanente. Todavia, um algoritmo bastante simplificado era obtido pelo uso de uma função perda de grau unitário.

Então este algoritmo era relacionado ao de Clarke e Gawthrop, com a diferença de que o ajuste do peso de entrada era feito "on-line". Esta estratégia resultava em um bom desempenho em muitos casos. Os resultados de Moden e Soderstrom em [MO 82] mostravam que esta linha também poderia ser aplicada a sistemas com uma função de transferencia real positiva. Contudo, esta

linha não era ótima, e poderia não resultar desempenho satisfatório para plantas de fase não mínimas. Neste caso, um algoritmo muito complexo que resolvia uma equação de Riccati para regime permanente, teria que ser utilizado. Um exemplo simulado mostra que este método tinha boas propriedades de convergência. O algoritmo apresentado por Toivonen em [TO 83a] era para sistema SISO (simples entrada, simples saída). Isto poderia ser generalizado para sistemas multivariáveis de uma maneira direta.

Toivonen em [TO 84b] apresentou como algoritmo auto-ajustável para adaptação "on-line" do peso projetado, em uma lei de controle ótima degrau unitário. O algoritmo era baseado em uma simples relação entre as variações em malha fechada e a variável de projeto. Essa linha era útil em aplicações práticas, já que muitas vezes seria mais direto utilizar um critério de projeto baseado nas variações de malha fechada do que um peso projetado em uma função perda quadrática.

3.4 - STC Para Implementação em um Único "Chip"

Dexter [DX 83] propôs uma implementação em um único chip de baixo custo para as aplicações comuns de controle, tal como sistemas de aquecimento doméstico. Isto era possível pelo uso de microcontroladores, que tinham microprocessador, programa, memória de dados, interfaces analógicas e digital. Todos juntos em um único circuito integrado. Embora controladores baseados neste microcontroladores tivessem limitações devido a sua

limitada capacidade de processamento, reduzida capacidade de armazenamento de dados no chip, bem como limitada capacidade de armazenamento de programa. Tais dispositivos poderiam ter aplicações em alguns casos, como por exemplo em sistemas comuns simples que tinham um atraso constante de transporte

e conjunto de pontos conhecidos, e que possuissem parâmetros que estivessem somente variando lentamente ou fossem constantes.

Em tais situações podemos simplificar o auto-regulador e reduzir o cálculo requerido sem danificar o desempenho total do sistema de controle. Dexter desenvolveu tal esquema de controle pela simplificação do STC com variação mínima de Clarke e Gawthrop. Resultados práticos são dados para ilustrar o comportamento do esquema de controle quando implementado em um microcontrolador comercial e controlando um sistema real. Este auto-regulador simplificado não poderia trabalhar com atrasos de tempo desconhecidos ou variáveis.

Era necessária uma escolha cuidadosa da taxa de amostragem. Maiores modificações eram necessárias para permitir estimativa de maior quantidade de parâmetros do controlador, para aumentar sua robustez e incorporar conjuntos de pontos variantes no tempo.

3.5 - STC Extendido (Melhorado)

Latawiec et al, em [LM 83] apresentou um controlador auto-ajustável "extendido" (ESTC) que era conceitualmente novo. Este, proporcionava efetivo controle auto-ajustável de sistemas

"flutuantes", sem a necessidade de ajuste externo, ou fixação de um parâmetro, incluindo um coeficiente de compensação. Também poderia controlar plantas de fase não mínima estáveis em malha aberta. Tinha alta acuracidade de controle e robustez. Era possível mudar de um valor baixo do coeficiente de compensação, proporcionando uma acuracidade de controle apropriada, em condições normais de operação, para um valor mais alto que iria assegurar robustez. Era também possível mudar para um valor alternativo, no caso de qualquer emergência no processo. Uma extensão de capacidade de auto-ajuste não era possível para esquemas de controle adaptativo com índice de desempenho direto, a menos que os modelos fossem reconvertidos a um modelo de esquema indireto.

O controlador auto-ajustável generalizado de Allidina et al., em [Al 80] assemelhava-se um pouco ao controlador auto-ajustável de Latwiec et al., mas tinha uma convergência mais lenta devidos aos problemas de estimação da lei de controle. Exemplos de simulação demonstraram a superioridade do ESTC sobre o STC convencional do ponto de vista de rejeição, flutuação e projeção. É mostrado em alguns trabalhos que o STC possui bom desempenho para controle de processos industriais.

3.6 - STC Com Convergência "Dead-beat"

Yan et al., em [YA 84a] desenvolveu um algoritmo adaptativo baseado em um controlador Dead-beat. Ele utiliza o controlador

linear polinomial apresentado por Kucera em [KC 79], e o amostrador adaptativo citado por Yan et al., em [YA 83b]. O sistema foi projetado assim que a saída de um sistema de fase não-mínima pudesse ser seguida exatamente pela entrada de referência no tempo finito. A estabilidade do sistema poderia ser assegurada.

Minamid em [HI 84] também tinha considerado o problema de um sistema rastreador adaptativo Deadbeat. Utilizando uma técnica de decomposição ortogonal, a matriz lemma de pseudo-inversão foi aplicada para obter algoritmos recursivos para calcular a melhor solução para o problema de estimativa sequencial. Uma propriedade de convergência Dead-beat do algoritmo foi demonstrada. Resultados de simulação mostraram perfeito rastreamento da saída do sistema para a trajetória de referência em passos finitos, mesmo no caso de uma planta de terceira ordem de fase não-mínima instável, que foi submetida a pequena variação de parâmetros, em um tempo imprevisto.

3.7 - STC Preditivo

Uma nova linha para STC foi proposta por Ferteka em [FE 84], utilizando um método de predição de saída de memória finita linear atualizado em tempo real, como uma representação interna de processos incertos a serem controlados. A estratégia de controle foi projetada para minimizar, para o mais recente método de predição avaliável, o valor esperado de um critério quadrático

escolhido, admitindo uma certa meta de controle.

Em um STC semelhante, a lei de controle devia ser repetidamente atualizada a cada passo de controle. O algoritmo deveria ser numericamente estável, livre de singularidades, uniforme para toda situação que pudesse aparecer, e ao mesmo tempo o mais simples possível. Esses requisitos e a necessidade de ajustar o controlador em relação à sequência pré-programada do conjunto de pontos foi obtido por este novo método proposto por Perteka para uma síntese do controle ótimo quadrático linear, que formava a base para o STC preditivo. A síntese englobava o problema de controle (com sinal de comando pré-programado) e pré-alimentação de perturbações externas mensuráveis.

Diferente da equação de aproximação de Riccati, esse método resultava em algoritmos (ou forma explícita em caso de baixa ordem) que eram numericamente robustos, entretanto apropriados, para cálculo em tempo real utilizando microprocessadores de baixa capacidade de processamento.

O STC preditivo tinha vantagens definidas sobre o STC convencional baseados na hipótese de equivalência e redução de dados anteriores. Isto poderia resultar nos efeitos indesejáveis citados em [AS 80a] e [AS 80b] se o controlador de malha fechada não fosse excitada externamente e se nenhuma precaução fosse tomada [KR 82]. A principal causa dessa dificuldade era que a lei de controle linear fixada para o qual o algoritmo auto-ajustável finalmente convergia, assumia uma dependência linear sobre o dado no regressor utilizado para atualizar as estimativas no preditor

de parâmetros. No presente método, essa dependência linear não aparece. Maiores trabalhos nesses simples STC robustos e aplicações práticas serão possíveis.

3.8 - STC Com Parâmetros de Variação Rápida

Existem poucos algoritmos de STC que trabalham com sistemas variantes no tempo. Resultados de simulação mostram que, em sistemas com rápida variação no tempo, o desempenho dos algoritmos é limitado. Isso devido ao fato de que esses algoritmos são baseados em um modelo invariante no tempo.

Xianya e Evans em [XI 84] desenvolveram um novo algoritmo capaz de controlar sistemas desconhecidos com os parâmetros variando rapidamente. Eles apresentaram uma série de implementações do estimador de mínimos quadrados padrão e estruturas de controle "um passo a frente", que asseguravam bom desempenho para controladores adaptativos para parâmetros de sistema com variação rápida.

A primeira implementação dizia respeito à velocidade de convergência do algoritmo de estimação dos parâmetros, desde que a velocidade de convergência do estimador de parâmetro, e a taxa de variação no tempo permitido fossem diretamente relacionadas. Esse algoritmo modificado convergia mais rapidamente que o algoritmo dos mínimos quadrados padrão. Segundo, um procedimento foi aplicado para assegurar que o algoritmo de estimação permanecesse ativo. Finalmente, e o mais importante de tudo, as

variações desconhecidas de parâmetros foram modeladas pelo uso de um modelo variante no tempo de complexidade reduzida.

Isto permitiria bom desempenho, até mesmo quando os parâmetros desconhecidos, estão variando senoidalmente e com mudanças de grau. Muitos estudos de simulação demonstravam claramente a habilidade desses algoritmos para controlar sistemas variantes no tempo desconhecido. Em particular, parâmetros desconhecidos de variação senoidal, de grau e rampa são considerados. O efeito de diferentes modelos de parâmetros foram estudados. É importante notar que em todos os casos, um controlador adaptativo determinístico de padrão não era hábil para controlar o sistema, enquanto o algoritmo modificado tinha bom desempenho.

Ainda que a convergência deste algoritmo, no caso geral onde os parâmetros estão variando de um modo arbitrário, não fosse comprovado, uma prova de convergência foi dada para o caso de parâmetro linearmente variante no tempo, que incluiu o caso invariante no tempo como um caso especial. Uma forte hipótese de excitação permanente foi requisitada. Se os parâmetros na planta real não variassem linearmente, mais variassem suavemente e podessem ser razoavelmente aproximados por uma função linear, então um bom controle era obtido.

3.9. STC Dupla Faixa de Amostragem

Certas aplicações necessitam que o intervalo de controle

seja grande devido à dinâmica dos processos, como em sistemas que respondem lentamente. Um exemplo pode ser o controle de frequência de carga em um sistema de potência. Também podem haver restrições tais como desgaste e estrago nos equipamentos de controle, que possam limitar a frequência em que o controle deveria estar colocado.

Um STC convencional não pode ser utilizado em tais casos. É desejável usar intervalos de controle e amostragem de dados diferentes, assim que a frequência de amostragem é mantida a um valor apropriado. Kanniah e Malik em [Ka 84a] propuseram um regulador de dupla taxa de amostragem (DSSTR) em que um pequeno intervalo de dupla taxa de amostragem e um grande intervalo de controle eram utilizados, resultando em um controle periodicamente constante. As vantagens do uso do DSSTR eram:

1. No caso onde uma redução no intervalo de controle poderia ajudar a mover os zeros dentro do círculo unitário, a dupla taxa de amostragem poderia ser utilizada para atingir tal propósito. Isto tinha sido demonstrado através de um exemplo. Se a planta fosse de fase não-mínima para maior amostragem selecionada, amostras eram dirigidas por raízes instáveis em malha fechada, mesmo quando controlada por um DSSTR. Se o cálculo do tempo não pudesse ser reduzido, tinha-se de recorrer a uma estratégia sub-ótima. Contudo, para plantas de ordem três ou mais, haveria pelo menos um parâmetro a menos, e isso poderia reduzir o tempo de cálculo para a mesma capacidade do sistema. Para a mesma classe de plantas, isto moveria os zeros para dentro do círculo unitário.

2. Plantas próximas da fase não-mínima podiam ser controladas por DSSTR.

3. Uma vez que o controlador era um filtro digital, os problemas de quantilização bem conhecidos poderiam ser contornados se um microcomputador de pequeno porte fosse usado como controlador. Contudo, se um DSSTR fosse utilizado problemas devido à quantilização não apareciam e poder-se-ia ter implementação de um processador de pequeno porte. Isto não levava a um aumento de cálculo. Obtinha-se resposta ótima e estável.

4. Tinha sido demonstrado para uma planta arbitrária que a variação em termos das maiores, podia ser reduzida pela taxa de amostragem. Também tinha sido mostrado que a saída de um DSSTR era superior em termos de menor autocorrelação de amostras. O DSSTR tinha um desempenho melhor que um STC convencional para uma dada aplicação.

5. Para uma planta de terceira ou maior ordem era possível representá-la somente por dois parâmetros B , sem qualquer aproximação, em caso onde maiores amostras eram coordenadas por tempo de cálculo, podia ser obtida vantagem desta redução nos parâmetros para ter um intervalo de controle reduzido.

6. DSSTR não requeria estimação de estado, mais necessitava de amostras adicionais para ser obtido.

7. Em amostragem controlada por interrupção implementada com um microprocessador M6800, uma interrupção tomava o máximo de 250 μ s para amostrar, converter e ler o dado. Isto era insignificante comparado ao tempo gasto para identificação e controle,

que podia ser da ordem de 100 μ s.

Uma aplicação bem sucedida de DSSTR para controle de excitação de um gerador síncrono é citado por Kanniab et al., em [Ka 84b]. Kanniab et al., em [Ka 84c]. Os autores discutem um regulador universal baseado em microprocessador, utilizando dupla taxa de amostragem. Detalhes relevantes de implementação foram apresentados com ênfase na aquisição de dados, amostragem controlada por interrupção, e teste de suficiência de tempo.

O "software" foi desenvolvido usando um "Motorola Exociser" e escrito em linguagem "Assembly Motorola". Detalhes experimentais foram apresentados para mostrar que desempenho satisfatório era possível com essa técnica para controle de excitação de um gerador síncrono. Para esses testes, a identificação da máquina síncrona era feita como um modelo de terceira ordem. Uma consideração de dupla taxa de amostragem por somente dois parâmetros do polinômio B era suficiente. Maiores amostragem e menores intervalos de amostragem eram fixados a 100 ms e 16,67 ms, respectivamente.

Uma mudança de degrau foi introduzida na entrada geradora para obter um controle que mantém o erro de tensão a um valor máximo, e evita oscilações excessivas no ângulo de carga. Resultados experimentais mostraram que mesmo após uma maior perturbação na variável controlada, o controle era razoavelmente estável e permanecia dentro de limites toleráveis. Como um controle suave não poderia ser possível com um STR convencional, pelo menos uma raiz do polinômio B poderia ser muito próxima ao

círculo unitário.

Dupla taxa de amostragem fazia o zero mover-se para dentro. Há um grande espaço para utilizar o DSSTR em uma variedade de aplicações.

Observação: (B é o vetor dos parâmetros de variável de entrada da equação característica).

3.10- STC Quadrático Linear Paramétrico

Makila em [Ma 84b] desenvolveu STR usando teoria 'ótima de realimentação de saída para aplicações tais como auto-ajuste de reguladores PID e controle descentralizado adaptativo. O problema era quadrático paramétrico para controladores de estrutura fixa. O projeto do regulador era baseado na idéia de minimização de um critério quadrático em regime permanente em relação aos parâmetros reguladores.

O critério quadrático de regime permanente era ajustável em muitos problemas de controle de processos. Neste sentido a ordem ou estrutura do retangular era especificada independentemente do modelo estimado do processo. Isto resultava em alguma flexibilidade como em auto-ajuste de reguladores simples. Além disso o problema de cancelamento de zero, resultava no uso de alguns esquemas adaptativos para sistemas com somente três zeros [La 83], que podiam ser evitados por este método.

Para um auto-regulador L.Q. (Quadrático Linear) paramétrico explícito, foi desenvolvido o método de mapeamento descendente linear (LDM) mostrado em [Ma 83a], para solucionar o problema de

uma generalização de STR no espaço de estado, baseado na teoria LQG (Linear Quadratic Gaussian) para problemas LQ paramétricos.

O auto-regulador LQ paramétrico poderia ser generalizado para estruturas reguladoras lineares fixadas arbitrariamente usando uma forma apropriada do método LDM. Isso faria esse algoritmo ser útil em controle descentralizado adaptativo.

3.11 - Auto-Regulador Musmar

O termo Musmar significa "Regulador Adaptativo Multi-Variável Multi-Degrau". O algoritmo Musmar foi introduzido por Menga e Monga em [ME 80]. Outros trabalhos foram apresentados por Mosca et al., em [MS 80a, MS 82b, MS 83c, MS 83d, MS 83e, MS 83f] relacionados a análise e aplicação para plantas mal definidas ou atraso de transporte de I/O de variação no tempo.

Nesta linha, Grego et al., em [Gr 84], mostrou as vantagens da simplicidade de cálculo e robutez numérica de esquemas adaptativos diretos, sem perda de maior flexibilidade e melhor desempenho de esquemas adaptativos indiretos. A simplicidade de cálculo foi mantida usando mínimos quadrados estimados de um modelo preditivo multi-degrau do sistema de malha fechada.

O regulador resultante produziu uma solução LQG aproximada e possuía assim a rapidez e robutez intrínseca de projeto LQG. Simulações extensivas tinham confirmado as características atrativas dos auto-reguladores adaptativos falhavam, por exemplo, as plantas de fase não-mínima, plantas cuja ordem não era estimada e plantas com função de transferência real não positiva.

3.12 - STC com Auto-Alocação de Pólos

Uma idéia interessante de STC foi apresentada por Mc Bermott et al., em [MC 84]. Essa nova técnica permitia que pólos de malha fechada fossem auto-ajustados "on-Line" para otimizar a resposta, permitindo ao projetista especificar somente a ordem do modelo interno e as características do ruído.

O período de amostragem era também determinado "on-Line". O controlador era mais robusto e podia facilmente manusear sistemas de fase não-minima instáveis em uma configuração de malha simples

Isto permitia uma grande faixa de aplicação onde poucos dos métodos existentes poderiam trabalhar. Esse STC incorporava a localização de pólos em malha fechada pelo critério principal de projeto para função objetiva de Clark e Gawthrop, e também utilizava a linha de allidina e hughes [Al 80].

O algoritmo incluía muitas extensões para implementar robustez: Um compensador de variável "Dead-Time" para proceder com atraso de tempo variável e desconhecido, e um método de tratamento de "Off-Set" de regime permanente conservando o integrador na malha continuamente.

Nenhum dos métodos de alocação de pólos poderia ser eficiente com as perturbações de carga desconhecidas, isto é, pela estimativa da perturbação e sua compensação diretamente. Estudos de simulação mostram a eficácia desta técnica.

3.13 - Controle Distribuido usando STR

Um desenvolvimento recente em controle de processo industrial é a aplicação de controle distribuído devido a segurança e a capacidade de computadores digitais com significativa diminuição do custo de "Hardware". Contudo, a teoria para o controle descentralizado de sistemas desconhecidos ou variáveis no tempo não tem acompanhado o passo e consequentemente o passo e consequente alcance para a pesquisa.

Costin e Buchner em [Ca 83] propuseram um algoritmo auto-ajustado modificado para o caso de controladores descentralização. Em controladores completamente descentralizados de um sistema multi-variável de ordem n , os controladores eram restritos a um conjunto de n controladores SISO.

Uma vez que cada controlador tinha somente informação local disponível, o conjunto de n controladores de mínima variação (exceto quando o sistema estava completamente desacoplado). Por isso o uso de controladores SISO não poderia em geral, reduzir a variação das medidas para o valor mínimo. Desejava-se minimizar interações de sub-sistemas pela coordenação dos controladores locais individuais. Isso reduzia a possibilidade de controladores individuais regularem suas medidas locais e causarem problemas para os outros sub-sistemas.

Costin e Buchner em [Co 83] propuseram que a coordenação fosse feita modificando a equação de atualização para calcular os parâmetros controladores do STR. Esta modificação envolvia o uso de medidas dos outros sub-sistemas. Em aplicações típicas de controle digital descentralizados essa informação estava

usualmente disponível assim como cada medida de malha era então fornecida à interface operadora centralizada.

Informação sobre os outros sub-sistemas não eram requisitadas pelas partes controladoras do algoritmo. Resultados de simulação mostravam que o algoritmo proposto resultava em implementações significantes sobre um conjunto completamente descentralizado de STR para controle de um processo multi-variável acoplado. Havia redução nas variações de controle e na importância das variações de saída da planta de controle.

Além disso, esse algoritmo poderia ser implementado naturalmente em um sistema de controle distribuído por computador.

3.14 - Eliminação de "Off-Set" em STC

O problema de "Off-Set" aparece em muitas aplicações de controle de processos considerando perturbações de carga que podem ser monitorados por "Drift" ou com degraus aleatórios ocorrendo em instantes não determinados do tempo. Este "Off-Set" poderia ser eliminado para tornar o STC aceitável industrialmente.

Um dos métodos adotados é o de inserir um integrador no caminho anterior. Mas isto causa dificuldade na análise da parte adaptativa do controlador, desde que o correspondente modelo de ruído também seja afetado. Tuffs e Clarke em [TU 85] sugeriram um modelo apropriado para o processo distribuído no qual o aspecto de integração do controlador era derivado de uma forma natural.

Em controle auto-ajustado geralmente assume-se que a perturbação é estacionária com densidade espectral racional. Isto

conduz à média de movimento auto-regressiva controlada ou modelo Carma. O modelo Carma resulta em um "Off-Set" entre a medida e o valor desejado, quando regulando uma planta submetida a perturbação de carga constante sobre um conjunto de pontos não nulos.

Em vista disso, pode-se empregar um outro modelo. Uma média de movimento integrado auto-regressivo controlado, o modelo Carma na qual o termo ruído é não estacionário. Devido as suas propriedades e ao fato que as leis do controle de integração surgem naturalmente, esse modelo Carma é uma base mais realista para obtenção de algoritmos adaptativos, e também conduz a um caminho unificado para eliminação de "Off-Set". Mostra-se que boa conduta adaptativa é possível para STC por alocação de pólos de variação mínima generalizada.

Este caminho gera termos de controle integral de uma maneira natural e conduz a um algoritmo PID geral para modelos e plantas simplificados. Dois modelos para controle auto-ajustado para planta Carima são dados:

- 1- Controle seguindo modelo integrado e K-incremental;
- 2- Linha sub-ótima de técnica de alocação de pólos integrada e K-Incremental para conjunto de pólos seguidores.

Obtem-se quatro algoritmos destes caminhos, sendo analisados para comparar seus relativos com especial referência à resposta esperada para uma perturbação de carga degrau. Mostra-se que o controlador de alocação de pólos equivalente como consideração de tempo de rejeição de perturbação, no estudo de restrições sobre polinômios B admissíveis e, a priori, com conhecimento do ponto

de atraso.

Simulações extensivas mostram que a forma de integração do STC Clarke & Gawthrop é particularmente afetiva em termos de rejeição de perturbações de carga e boa estimação de parâmetros.

Contudo, isto é aplicável somente a plantas de fase mínima. Para plantas de fase não-mínima tem-se que utilizar um controlador por alocação de pólos, mais uma vez baseado no modelo Carima.

Pode haver dificuldade de convergência se planta está descrita pelo modelo Carima, podendo ser evitado pelo uso de observador (ou filtro de dados) polinomial $T(Z^{-1})$. Pode-se fazer referência a Tuffs e Clarke em [Tu 85]; onde o principal ponto deste artigo é o que o modelo Carima é uma representação mais realista de uma planta industrial.

Deste modo, obtém-se leis de controle com tendência naturalmente integrante; além de que, é mais fácil produzir algoritmos que são extensões para reguladores PID clássicos, mas que podem operar com plantas que têm "Dead-Time" significativo.

3.15 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Wa 82a] - Warwick, K; "Self-Tuning Property of State-Space Self Tuners"; IEE Proc., 129, PT.D: 96-100 (1982)

[Kc 79] - KUCERA, V; "Discrete Linear Control: The Polynomial Equation Approach"; Wiley, New York, 1979

[Al 80] - Allidina, A. Y., and Hughes, F.M.; "Generalized Self-Tuning Controller with Pole-Assignment", IEE Proc., 127, PT. D: 13-18 (1980)

[MI 84] - Minamid, N.; "Design of a Dead-Beat Tracking System", Int. J. Control; 39: 63-82 (1984)

[DX 83] - Dexter, A.L.; "Self-Tuning Control Algorithm for Single-Chip Micro; Computer"; IEE Proc., 130, PT. D: 255-260 (1983).

[LW 83] - Latawiec, K., and Chyra, M., "On Low-Frequency and Long-Run Effects in Self-Tuning Control", Automatica, 19: 419-424 (1983)

[YA 84a] - Yan. S.Y.; Adachi, N and Tokumaru, H., "Self-Tuning Controller With Dead-Beat Convergence", Int J. of Control, 39: 159-172 (1984).

[SH 82] - Shieh, L. S., Wang, C. T. and Tsay, Y. T., "Multivariable State-Feedback Self-Tuning Control", Proc. Ifac. Symp. on Identification and System Parameter Estimation, Washington, D.C. 1389-1394 (1982).

[YA 83b] - Yan, S.Y., Adachi, N, and Tokumaru, H, "On Finite Time Setting Adaptive Observers", SICE, 19: 124 (1983)

[HE 82] - Hesketh, t: "State Pole-Placing STR Using Input-Output Values", IEE PROC., 129, PT.D: 123-128 (1982)

[MD 82] - Modén, P.E., and Soderstrom, T., Stationary Performance of Linear Stochastic System Using Single-Step Optimal Control, IEEE Trans. Auto. Contr., Ac-27: 214-216 (1982).

[TD 84b] - Toivonen, H.T., "A Self-Tuning Regulator With On-line Cost Function Adaptation", Int. J. Syst Science, 15: 1189-1195 (1984)

[PE 84] - Perteka, V., "predictor Based Self-Tuning Control", Automatica, 20: 39-58 (1984)

[KA 84c] - Kanniah, J.; Malik, O.P., and Hope, G.S., "Self-Tuning Regulator Based on Dual-Rate Sampling", IEEE Trans. Auto. Control., Ac-29: 755-759 (1984)

[WA 82b] - Warwick, K., and Wescott, J. K., "Arbitrary Linear Output Feedback Self-Tuners", Proc ifac. Symp. on Identification and System Parameter Estimation, Washington, D.C.; 1169-1174 (1982)

[KA 84a] - Kanniah, J., and Malik, D.P., "Self-Tuning Regulators with Periodically Constant Control", Int. J. Control., 40: 585-602 (1984).

[XI 84] - Xianya, X., and Evans, R.J., "Discrete-Time Adaptive Control for Deterministic Time-Varying Systems", Automatica, 2: 309-319 (1984).

[AN 71] - Anderson, B.D.O., and Moore, J. B., "Linear Optimal Control", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1971.

[MS 83c] - Mosca, E., and Zappa, G., "Over-Parameterization, Positive Realness, and Multistep Minimum Variance Adaptive Regulators, in Nonlinear Stochastic problems" (R.S. Buch and J.M.F. Moura, Eds.), D. Reidel, Dordrecht, 1983

[ME 80] - Menga, G., and Mosca, E., "Multivariable Adaptive Regulators Based on Multistep Cost Functional in Advances in Control" (D.G. Lainiotis and N. S. Tzannes Eds.), D. Reidel, Dordrecht, 334-341, 1980.

[TO 83a] - Toivonen, H. T., "Variance Constrained Self-Tuning Control", Automatica, 19: 415-418 (1983).

[MA 83a] - Makila, P.M., "Linear Quadratic Design of Structure Constrained Controllers", Proc. and American Control. Conf., San Francisco (1983).

[LA 83] - Landau, I.D., M. Saad, M., and Ortega, R., "Adaptative Controllers for Discrete-time Systems with Arbitrary Zeros: A Survey", Ifac. Woorkshop on Adaptative Systemsin Control and Signal Processing, San Francisco (1983).

[TS 81] - Tsay, Y. T., and Shieh, L. S., "State-Space Appronch to Self-Tunning Feed Back Control with Pole-Assignment", IEE Proc., 128, PT. D: 93-101 (1981).

[MS 82b] - Mosca, E., and Zappa, G., "a Robust Adaptive Control Algorithm for Microcomputer Based Implementation", Control and Computers, 10: 55-56 (1982).

[MS 80a] - Mosca, E., and Zappa, g., "Musmar Basic Convergence and Consistency Properties", in Lecture Notes in Control, 28: 189-199, Springer-Verla G, Berlin, 1980.

[KR 82] - Karny, M., "Identification with Interruptions as an Anti-Bursting Device", Kybernetika, 18: 320 (1982).

[MS 84f] - Mosca, E., and Zappa, G., "Removal of positive Realness Condition in Minimum-Variance Adaptative Regulators by Multistep Horizon:", IEEE Trans. Auto. Control., Ac-29: 844-846 (1984)

[MS 83d] - Mosca, E., "Multivariable Adaptative Regulators Based on Multistep Cost Functionals", in Nonlinear Stochastic Problems, (R.S. Buck and J.M.F. Moura, Eds.), D. Reidel, Dordrecht, 1983.

[WA 81c] - Warwick, K., "Self Tunning Regulators a State Space Approach", Int. J. Control, 33: 839-858 (1981)

[KA 84b] - Kanniah, J., Malick, O.P., and Hope, G.S., "Excitation Control of Synchronnous Generators Usine Adaptative Regulators", Part I and II, IEEE Trans. Power App. and Syst., Pas-103:897-910 (1984).

[MA 84b] - Malika, F.M., "A Self-Tunning Regulator Based on Optimal Output Feed Back Theory", Automatica, 20 671-679 (1984).

[AS 80a] - Astrom, K.J., "Self-Tunning Regulators: Design Principles and Aplications", in Applications of Adaptative Control (K.S. Narendra and R.V. Monopoli Eds.), Academic Press, New York, 1980.

[AS 80b] - Astrom, K.J., "Design Principles for Self-Tuning Regulators", Methods and Applications in Adaptive Control (H. Unbehauen, ed), Springer-Verlag, Berlin, 1980.

[GR 84] - Greco, C., Menga, G., Mosca, E., and Zappa, G., "Performance Improvements of Self-Tuning Controllers By the Multistep Horizon, The Musmar Approach", Automatica, 20: 681-699 (1984).

[MT 90b] - Masten, Michael, K., "Advanced Show Case of Adaptive Controller Design", Int J. Adapt. Control Signal Process, V4, N2, 89-98 (1990).

[MS 83e] - Mosca, E., and Zappa, G., "An MV Adaptive Controller for Plants With Time-Varying I/O Transport Delay", fac Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco (1983).

[MC 84] - Mcdermott, F. E., and Mellichamp, D.A., "An Auto-Pole Placement Self-Tuning Controller", Int.J. Control, 40: 1131-1147 (1984).

[Co 83] - Costin, M. H., and Buchner, M.R., "Distributed Control Using Self-Tuning Regulators", Proc. Ifac. Workshop on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, San Francisco, 301-307 (1983)

[TU 85] - Tuffs, P.S. and Clarke, D. W., "Self-Tuning Control of off-set: A unified Aproch", IEE proc. 132, PT. D: 100-110 (1985).

[MT 89a] - Masten, Michael, K., and Couen, Herbert, E., "Show Case of Adaptative Controller Designs", Int. J. Adapt. Control Signal Process, V3, N2, Jun/89, 95-101 (1189).

[MN 88] - Minter, B. J., and Fischer, P. G., "Comparison of Adaptive Controllers: Academic Vs Industrial". Proc. DF American Control Conference/88, V88, PT 1-3, 1653-1658 (1988).

CAPÍTULO 4

ASPECTOS TEÓRICOS DA REALIMENTAÇÃO EM MALHA FECHADA

4.1- INTRODUÇÃO

Um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) pode melhorar o desempenho de um sistema consideravelmente, sobre aspectos como estabilidade, sobressinal, erros de regime, tempo de subida e de acomodação. Em sua forma ideal, a função de transferência de um controlador PID é sempre apresentada como:

$$(4.1) \quad G_c(s) = K_p + K_i/s = K_d s$$

$$(4.2) \quad G_s(s) = K_p (1 + 1/T_i s + T_d s)$$

Bertucci em [BE 90] faz um estudo do desempenho de um controlador PID aplicado a um sistema pneumático, iniciando pelo estudo do controlador P (proporcional), considerando o diagrama de blocos dado na figura 4.1, onde:

$$G_c(s) = K_p$$

$$D(s) = 0$$

$$H(s) = 1$$

DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM SISTEMA DE
CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO DE SAÍDA

FIG. 4.1

Onde $M(s)$ é a variável de saída do controlador (ver figura 4.2 a e b) com $D(s) = 0$ e $V(s) = 1$. Defini-se uma função objetiva de controle tal que a saída $Y(s)$ responderá à entrada $V(s)$ após um atraso de T segundos, ou:

$$(4.4) \quad Y(s)/V(s) = \exp(-Ts)$$

Considerando-se a FTNF da figura 4.2 a ou b e igualado à equação (4.4), obtem-se uma expressão para o controlador $G(s)$, quando o processo for igual ao da equação (4.3):

$$(4.5) \quad G_c(s) = M(s)/E(s) \\ = (T_1s + 1)(T_2s + 1)/K(1 - \exp(-sT))$$

Portanto a saída do controlador em relação ao erro é dado por:

$$(4.6) \quad M(s) = (T_1s + 1)(T_2s + 1) E(s)/K + M(s) \exp(-sT)$$

Aproximando-se o atraso tal que $\exp(-sT)$ aproxime-se de $(1 - Ts)$, a equação fica:

$$(4.7) \quad G_c(s) = (T_1 + T_2)/KT * [1 + 1/(T_1+T_2)s + ((T_1*T_2)/(T_1+T_2)) * s]$$

que é uma lei de controle para o PID.

Aproximando-se o processo $G_p(s)$ para primeira ordem, ou $T_2=0$, necessita-se aumentar de um termo a série que aproxima $\exp(-sT)$ para obter-se a ação derivativa. Com esse simples algoritmo pode-se implementar um controlador PID tanto pela equação (4.5), quanto pela equação (4.7), melhorando a aproximação do tempo morto ou não, e buscar melhores procedimentos de ajuste de seus parâmetros.

Para tornar real a lei de controle de PID, um zero deve estar sempre acompanhado de um pólo, ou seja, na prática a ação derivativa se aproxima de um compensador de avanço de fase, isto é, deve-se ter como expressão para o PID:

$$(4.8) \quad G_c(s) = (K_p/(1+T_f s)) * (1 + 1/T_i s + T_d s)$$

Esse pólo a mais deve diminuir os efeitos indesejáveis de um filtro passa-alta, como ocorre com controlador P.D. Alguns autores [MI 85], [KR 84] modificaram a estrutura do PID ideal (figura 4.2.b), que é não-iterativo, para a estrutura do PID real (figura 4.2.a), representando a seguinte expressão para $G_c(s)$:

$$(4.9) \quad G_c(s) = K * (T_2 s + 1)/(T_s + 1) * [1 + (1/T_1 s)]$$

onde os parâmetros do PID são dados por:

$$(4.10) \quad \begin{aligned} K_p &= K * ((T_1 + T_2)/T_1); \\ T_i &= T_1 + T_2; \\ T_d &= (T_1 * T_2)/(T_1 + T_2) \end{aligned}$$

Essa diversificação na estrutura básica do controlador PID passou a ser mais interessante com o avanço dos controladores eletrônicos e posteriormente digitais, onde se aumentou-se a liberdade de implementação na busca de melhores resultados.

(a)

(b)

DIFERENTES ESTRUTURAS PARA O CONTROLE PID

(a) REAL; (b) IDEAL

FIG. 4 2

4.3- CONTROLE PID DIGITAL

Os sistemas de controles lineares com dados amostrados, que já eram bastante atrativos, foram cada vez mais sendo utilizados com o avanço tecnológico. Uma grande vantagem em se trabalhar com controle digital, está na capacidade para diminuir o tempo de programação de computadores, para se manter atividades de controle de malha simples ou não, podendo-se controlar vários processos com grande confiabilidade.

Há outras vantagens como o aumento da sensibilidade, controlando potência com sinais de baixo nível; uso direto de transdutores digitais (aumentando a imunidade a ruído e não-linearidades) implementação exata das leis de controle; possibilidade de controle de vários com o mesmo canal de comunicação.

Porém, existem também desvantagens como aumento da complexidade de projeto; uma perda, sempre existente, no sinal de informação; inviabilidade de controlar processos com constantes de tempo muito pequenas.

Divide-se as técnicas de abordagem para análise de projeto de controladores digitais em duas categorias: Digitalização (DIG) e Direta (DIR). A técnica DIG permite a análise e síntese do sistema a dados amostrados através do plano W , ou pelo uso da aproximação de Padé, inteiramente no plano S . Já a técnica DIR permite esse desenvolvimento no plano Z .

4.3.1- OS PLANOS S, W E Z

Um sinal amostrado através de impulsos, contém um espectro em frequência dividido em uma banda primária com as bandas complementares. Considerando-se as características de filtro passa-baixa de um extrapolador de ordem zero, pode-se em geral considerar apenas a banda primária. Isso nos leva ao mapeamento do plano S para o plano Z, representado por um círculo de raio unitário no plano Z.

Tem-se na figura 3 essa relação para σ , ε e W constantes no plano S e no plano Z. Para entender-se o critério de instabilidade de Routh faz-se uma transformação bilinear tal que:

$$(4.11) \quad Z = (Tw + 2)/(-tw + 2)$$

$$(4.12) \quad W = (2/T) * [(Z - 1)/(Z + 1)]$$

A equação (4.12) representa uma aproximação de $Z = \text{Exp}(ST)$, quando T tende a zero. A transformação entre o plano W e o plano S é dada por:

$$(4.13) \quad W = (2 * \text{tgh}(sT/2))/T$$

Se $W = \sigma_w + j W_w$, tem-se para o eixo imaginário do plano S, com $S = j W_s$:

$$(4.14) \quad W_w = (2 * \text{tgh}(W_s * T/2))/T$$

e para o eixo real, com $S = \sigma s$:

$$(4.15) \quad \sigma w = (2 * \tanh(\sigma s * T/2))/T$$

Para as aproximações $Ww = Ws$ e $\sigma w = \sigma s$, deve-se ter $(Ws * T/2) < 0.3 \text{ RAD}$ e $(\sigma s \exp(2) * T \exp(2)) < 8.0$, caso contrario ocorrerá "empenamento" (Warping) entre os planos. Muitos métodos foram desenvolvidos, para aproximar-se o domínio-Z e o domínio-S; o mais comum é o da transformação de Tustin ou

$$(4.16) \quad S = (2/T) * (1 - Z \exp(-1)) / (1 + Z \exp(-1))$$

que é bilinear, ou seja, garante que

$$(4.17) \quad Z = (1 + ST/2) / (1 - ST/2)$$

para evitar o "empenamento" dos planos, deve-se garantir novamente que $(Ws * T/2) < 0.3 \text{ RAD}$.

Baseando-se nessas correlacoes, pode-se implementar funções de transferencia no plano S para o plano Z, garantindo-se, na maioria das vezes, as características desejadas.

TRANSFORMAÇÃO DO PLANO s PARA PLANO z

FIG. 4.3

4.3.2- TÉCNICA DE DIGITALIZAÇÃO (DIG)

Esse método requer um modelo satisfatório no plano S. Obtém-se isto se os pólos e zeros da função de transferência no plano S estiverem na área hachurada da figura 4.4, onde T é o período de amostragem do sistema digital. Pode-se aproximar o amostrador e extrapolador de ordem zero por um bloco contínuo no tempo, de tal forma que se T for pequeno o suficiente, utiliza-se uma aproximação de Padé de primeira ordem como se segue:

$$(4.18) \quad G_a(s) = (G_{eoz}(s))/T = (1 - \exp(-Ts))/Ts \\ \approx 2/(Ts + 2)$$

onde $G_a(s)$ é a função do controlador.

O diagrama em blocos indicado é o da figura 4.5, onde os blocos E_{oz} são os extrapoladores de ordem zero e $C_d(z)$ é o conjunto que atua como controlador digital.

LOCALIZAÇÃO REQUIRIDA NO PLANO z PARA UMA APROXIMAÇÃO POR TUSTIN (ÁREA HACHURADA)

FIG. 4.4

CONTROLADOR DIGITALIZADO EM CASCATA COM O PROCESSO

FIG. 4.5

Deve-se, em primeiro lugar, converter o sistema de controle amostrado em um sistema pseudo-contínuo no tempo (PCT), através da incorporação dos amostradores Eoz com funções de transferência como da equação (4.18), tanto no domínio S como W, para determinar a melhor aproximação. Por meio do lugar das raízes, determina-se o ganho Kp do controlador C(s), bem como a função de transferência do controlador.

Em seguida, através da transformação de Tustin, passa-se Gc(s) para o domínio Z. A função de transferência entre a saída e a entrada será:

$$(4.19) \quad Y(z) = \frac{[G_c(z)] * T * U * G_p(z)}{1 + [G_c(z)] * T * U * G_p(z)}$$

Tem-se assim, bastante flexibilidade para implementar-se um controle PID digital, e isso, na verdade ocorre como indica a literatura. Utilizando-se uma lei de controle implementada diretamente por computador para Gc(z), tem-se então um CDD (controle digital direto). Uma forma bastante utilizada para representar a lei de controle referente ao PID digital, baseia-se em simples equações de diferença. Considerando-se um operador linear D, tal que:

$$(4.20) \quad Dc(t) = dc(t)/dt \approx \{C(nT) - c[(n-1)*T]\}/T$$

$$(4.21) \quad D^2c(t) = d^2c(t)/dt^2 \approx \{dc(nT) - Dc[(n-1)*T]\}/T$$

Pode-se então representar a equação (4.1) como:

$$(4.22) \quad U(t) (KdD^2 + KpD + Ki) = Y(t) D$$

e assim, obtém-se após alguma manipulação algébrica, uma expressão em Z:

$$(4.23) \quad \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{K(z^2 - az + b)}{z(z-1)}$$

que é fisicamente realizável, sendo $K = Kp + TKi + (Kd/T)$, $a = (TKp + 2Kd)/TK$ e, $b = Kd/KT$. Utilizando-se, por exemplo, outras formas de integração, tais como retangular, trapezoidal, etc, e/ou série de Taylor para a diferenciação, chega-se a outras expressões análogas à equação (4.23).

Entretanto, o aumento exagerado de termos pode trazer problemas computacionais (aumento do tempo de cálculo), além de encarecer o sistema. Mesmo assim o bom conhecimento das técnicas de método numéricos, pode resolver problemas tais como propagação de ruídos, estabilidade das equações diferenciais, etc.

Para se reconhecer se o método de discretização utilizado é suficiente, basta observar se ele é passivo de manter as seguintes características:

- Manter o mesmo resultado com blocos em cascata;
- Manter o mesmo nível DC ($S=0$, $W=0$ e $Z=1$);

- Ser estável;
- Manter a mesma resposta a impulso.

Como exemplo, o algoritmo de Tustin, garante as três primeiras características.

4.3.3- TÉCNICA DIR

Utiliza-se a técnica direta (DIR) quando a correlação entre os planos S, W e Z impossibilita que se atinja os objetivos propostos. Faz-se assim a transformação direta entre os pólos e zeros no plano S para o plano Z, através da relação $Z = \text{Exp}(ST)$. Para a expressão do PID dada na equação (4.1), tem-se a seguinte expressão no plano Z:

$$(4.24) \quad G_c(z) = K_p + (K_i z / z - 1) + [K_d (z - 1)] / z$$

A maior vantagem dessa técnica de projeto está no fato de que pode-se encontrar as especificações de desempenho com restrições menores sobre os parâmetros do controlador. A desvantagem é que ainda não existe um grande conhecimento, experiência ou ferramentas de engenharia para determina-ser o controlador desejado. Experimenta-se essa dificuldade quando procura-se analisar o lugar das raízes e a resposta frequencial do plano Z.

Existe um método tentativo de obtenção de $G_c(z)$ na forma direta, onde após escolher-se a função de transferência $H(z)$

entre a saída $Y(z)$ e a entrada $U(z)$, calcula-se $G_c(z)$ segundo a expressão:

$$(4.25) \quad G_c(z) = H(z) / [G_p(z) * (1-H(z))]$$

Assim, no caso de $H(z)$ ser de segunda ordem geralmente chega-se em $G_c(z)$ equivalente a uma forma de PID.

4.4 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ZI 42]- Ziegler, J.G. & Nichols, N.B. - "Optimal Setting For Automatic Controllers" - Transactions Of The Asme, Vol. 64, pp. 759-768, 1942

[PE 72]- Pemberton, T.J. - "PID: The Logical Control Algorithm". Control Engineering, pp. 66-61, May 1972

[MI 85]- Min, L.C. Et. Al. - "Tuning PID Controllers For First And Second-Order Lag Processes With Dead Time." - Int. J. Elect. Enging. Educ., Vol. 22 pp. 345-353, 1985

[Kr 84]- Krikelis, N.J. & Fassois, S.D. - "Microprocessor Implementation Of Did Controllers And Lead - Lag Compensators". - IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. IE-31, n.1, Feb. 1984

[BE 90]- Bertucci Neto, Victor - "Desenvolvimento Dos Controladores PID" - Dissertação de Mestrado - EESC - USP, 1990.

CAPÍTULO 5

PROJETO DE UM POSICIONADOR PLANO DE PRECISÃO (PPP) PARA INSPEÇÃO VISUAL AUTOMÁTICA VISANDO TECNOLOGIA DE CONTROLE ADAPTATIVO COM BASE NA REALIMENTAÇÃO EM MALHA FECHADA.

5.1- Considerações iniciais

Com base no que foi exposto nos capítulos anteriores, considerando as premissas de controle adaptativo, visão artificial e microdensitometria, nos parece viável a elaboração de um sistema tipo mesa de duas coordenadas, que possuísse a capacidade de operação em malha fechada com técnica PID, para posicionamento plano de precisão. A este sistema chamaremos PPP, e através dele será possível executar varreduras no plano, gerar trajetórias, possibilitando digitalizar objetos transparentes ou não. Possibilita ainda projeções variadas, com altas precisões de resolução utilizando uma pequena quantidade de memória e programação simplificada. A figura 5.1 ilustra o diagrama de blocos do PPP, e a figura 5.2 sua implementação física.

5.2- Descrição do PPP

5.2.1- Controlador de velocidade PID

Para se obter posicionamento de um elemento em movimento ao

DIAGRAMA DE BLOCOS DO PID

FIG. 5.1

IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA MECÂNICO DO PPP

FIG. 5.2

longo de um eixo é fundamental que se controle seu vetor velocidade, de forma que seja possível através de um sinal contínuo (no caso tensão elétrica) acelerar, desacelerar, frear ou ainda manter constante a velocidade do elemento. O controlador de velocidade tem esta função, que seria impossível em malha aberta, de resultado lento e impreciso, sem utilizar técnicas PID.

O controlador de velocidade (CV) torna-se então um dispositivo indispensável que através da referência de tensão a ele amostrada vai atuar no servomotor variando sua velocidade em malha fechada como ilustra o gráfico 5.1.

Este tipo de CV é comumente denominado de controlador de quatro quadrantes realizando operação PID pela proporcionalidade entre a tensão de referência e a tensão desenvolvida pelo tacogerador. A figura 5.3 ilustra o diagrama de blocos do CV.

GRÁFICO 5.1

DIAGRAMA DE BLOCOS DO CONTROLADOR DE VELOCIDADE PID

FIG. 5.3

5.2.2- Microprocessador Controlador de Posição

Uma vez tendo-se a velocidade sob controle é necessário o monitoramento constante do deslocamento para posicionamento e geração de trajetória.

Assim deve haver um sistema monitorando constantemente a leitura do codificador rotativo de pulsos e a sequência dos pontos programáveis que se deseja atingir. O processamento é executado em tempo real, através de controle em malha fechada com técnica PID. O sinal amostrado é a contagem de pulsos em canal duplo possibilitando a determinação do sentido de deslocamento, comparado com a referência de posição que é o ponto que se deseja atingir, a simplificação deste procedimento é mostrada na figura 5.4.

Desta forma é indispensável que o microprocessador para controle de posição possua a arquitetura mostrada na figura 5.5. A função de transferência do sistema está presente na EEPROM.

$$H(s) = K_p (1 + T_d s + 1/T_i s) G(s)$$

K_p : ganho proporcional

T_d : constante de tempo derivativa

T_i : constante de tempo integral

Diagrama de Blocos do PID de Posição

FIG. 5.4

ARQUITETURA DO PROCESSADOR PARA CONTROLE DE POSIÇÃO

5.3- Descrição do Sistema Mecânico

Todo controle eletrônico seria ineficaz se não se dispusesse de um sistema mecânico adequado a aplicação de posicionamento. Para a aplicação em questão é necessário que disponha rigidez mecânica suficiente e perfeição de alinhamento, de forma que só ocorra movimento na direção desejada. Esta necessidade foi satisfeita com a montagem de um sistema mecânico de alta rigidez como ilustram as figuras 5.6 e 5.7. Neste utilizamos guias circulares e rolamentos de esferas recirculantes, o que possibilita deslocamento suave, diminuição de atritos e eliminação de folgas. A garantia da flexa praticamente nula para o sistema da figura 5.7 é dada pela equação 5.1 e 5.2 com relação a figura 5.9.

VISTA LATERAL DO SISTEMA MECÂNICO DO PPP

FIG. 5.6

FIG. 5.7
VISTA EM PLANTA DO SISTEMA MECÂNICO DO PPP

Através das equações 5.1 e 5.2 pode-se considerar f_1 e f_m , desprezíveis pois sempre se aplicará F muito pequena, já que a massa das amostras que serão colocadas sobre a mesa do PPP é desprezível perto da massa do sistema.

Com relação ao elemento mecânico conversor de rotação em movimento linear, foi utilizado um fuso de esferas recirculantes pré-carregado o que possibilita folga axial "nula" entre a castanha e o fuso proporcionando assim que qualquer deslocamento angular no eixo do servomotor, em qualquer sentido seja convertido em um deslocamento linear no eixo do PPP com repetibilidade.

CAPITULO 6

METODOLOGIA PARA VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DAS MEDIDAS E RESULTADOS OBTIDOS.

6.1- Metodologia para confiabilidade das medidas.

Para se obter confiabilidade das medidas devemos proceder a aferição da precisão do sistema mecânico do posicionador plano de precisão (PPP), para ambos os eixos de deslocamento. (figura 6.1)

Considerando-se os seis principais graus de liberdade do movimento linear:

- retilinidade de deslocamento: deslocamento vertical e horizontal do elemento no plano perpendicular à direção do movimento (2 graus).

- "Pitch": deslocamento de torção do elemento no plano vertical paralelo ao deslocamento (1 grau).

- "Yaw": deslocamento de torção do elemento no plano horizontal paralelo ao deslocamento (1 grau).

- "Roll": deslocamento de torção do elemento no plano perpendicular à direção do deslocamento (1 grau).

EIXOS DE DESLOCAMENTO DO PPP

FIG. 6.1

6.2- Calibração Geométrica do PPP

Para se efetuar a calibração executamos o ensaio visando medir a composição dos efeitos de "WAY" e retilidade, para cada um dos eixos de movimento.

Utilizamos um esquadro de precisão (esquadro de granito Mitutoyo Classe 0), e um palpador indutivo de 1 de resolução.

Montando o esquadro sobre o PPP como indica a figura 2.1 efetuamos o deslocamento em X para um percurso de 100 mm, conectando a resposta do palpador a um traçador gráfico.

Repetimos o procedimento para 5 posições ao longo do eixo Y visando analisar a influência do "WAY" em X para várias posições.

Para cada posição de ensaio deslocamos o eixo X por 100 mm obtendo as curvas mostradas no gráfico 2.1.

Repetimos o procedimento análogo para o eixo Y como indica a figura 2.2, montando novamente o palpador indutivo efetuamos um deslocamento de 100 mm em Y para 5 posições diferentes ao longo do eixo X, visando analisar a influência do "WAY" em Y para várias posições.

Para cada posição de ensaio deslocamos o eixo Y por 100 mm obtendo as curvas mostradas no gráfico 2.2.

Efetuamos ainda um teste de perpendicularismo de deslocamento entre os eixos X e Y. Procedemos a montagem como indicado na figura 2.3, posicionamos o esquadro com sua aba maior

ENSAIO PARA MEDIR A COMPOSIÇÃO DOS EFEITOS
DE "YAW" E RETILINEIDADE DO EIXO X.

FIG. 2.I

FIG. 2.2

000000

ENSAIO DE "YAW" E RETILINEIDADE DO EIXO X. (PARA 5 PONTOS)

GRÁFICO 2.1

ENSAIO DE PERPENDICULARISMO NO DESLOCAMENTO ENTRE OS EIXOS X E Y.
GRÁFICO 2.3

paralela ao eixo X, efetuamos seu ajuste e deslocamos ao longo de X 80 mm com o apalpador conectado ao trocador. Após este evento, mantivemos o eixo X travado e deslocamos o PFP apalpando a outra aba de esquadro, sem mudar sua posição, ao longo do eixo Y gravando no mesmo gráfico o resultado do deslocamento em Y para 80 mm.

O resultado obtido encontra-se no gráfico 2.3.

CONCLUSÕES:

Dos ensaios efetuados concluimos que:

- Para os ensaios da composicao de efeitos de "WAY" e retilineidade o desvio de deslocamento e menor ou igual a 5 um, ainda observa-se que do grafico 2.1 e 2.2 que o comportamento fundamental do desvio se deve a retilineidade. Porem com desvio maximo de 5 um o PPP atende a precisao de sistema de inspecao visual.

- Para os ensaios de perpendicularismo observamos que os desvios maximos obtidos sao menores que 5 um (grafico 2.3) atendendo tambem a precisao do sistema de inspecao visual.

- Observe-se que tais resultados foram executados sem a climatizacao do ambiente visando simular a sua aplicacao real em um ambiente industrial. E possivel que os desvios, deslocamentos e precisoes maiores sejam obtidas com um maior controle das condicoes ambientais (temperatura, vibracao e ruidos).

6.3 - IMPLEMENTACAO DO SISTEMA PARA INSPECACAO DE COMPONENTES

6.3.1 - Inspecao de um componente mecanico

Implementamos um sistema de deteccao atraves de um emissor Laser (He Ne) com captacao por um foto-sensor Linear que permite medicao analogica para obstrucoes parciais do feixe de Laser. A figura 3.1 ilustra o sistema de sensoriamento a Laser.

SISTEMA DE SENSORIAMENTO LASER

FIG. 3.1

6.3.1.1 - Descrição do Sistema Montado

Montamos uma peça mecânica após uma operação de fresamento em um suporte adequado no FFP e efetuamos seu deslocamento programado com o feixe de Laser tangenciando seu contorno como mostra a figura 3.2.

Para se conhecer as características do comportamento do sistema Laser/Foto-sensor na medição de contornos foi efetuada uma calibração do sistema. Para tal foi feita uma montagem onde mediu-se o nível de sinal proveniente do Foto-Sensor a partir de um deslocamento conhecido. O registrador gráfico foi ligado no modo X-Y onde no eixo X foi conectado o sinal de um transdutor indutivo e no eixo Y o sinal do Foto-detector. A curva obtida está no gráfico 3.1

Observa-se no gráfico 3.1 que a resolução do sistema é da ordem de $4 \mu\text{m/V}$, sendo possível medir faltas devidas à rugosidade de superfícies. Ainda com ganhos adequados pode-se explorar mais a faixa mensurável do sistema.

Foram simulados dois tipos de falhas mecânicas para que o sistema pudesse ser testado. Tais falhas ocorrem contorno da peça, uma vez que o objetivo da medição é controlar os contornos. Seria também possível rastrear outros tipos de falhas, como por exemplo, acabamento superficial, trincas, etc.

O ensaio visa mostrar o comportamento da resposta da obstrução parcial ou total do feixe de Laser através da curva do sinal de saída do foto detector no traçador gráfico.

RESPOSTA DO FOTO-SENSOR EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO DO APALPADOR INDUTIVO.

GRÁFICO 3.1

6.3.1.2 - Resultados Obtidos

Efetuamos tres ensaios:

- 1 - Peça perfeita
- 2 - Peça com falha devido a quebra de ferramenta (simulado através da insercao de um pino no contorno lateral).
- 3 - Peça com falha na forma de reentrancias comumente vindas de operacoes iniciais como forjamento e fundicao.

A ilustracao encontra-se na figura 3.3.

Efetuamos um programa que executa o contorno da peça em questao e obtivemos o grafico 3.2 da resposta do foto-sensor para ensaio da peça perfeita.

Repetindo o mesmo programa, agora para peça com falha por quebra de ferramenta obtivemos o grafico 3.3.

Note-se na parte inferior de 3.2 e 3.3 as irregularidades de acabamento detectados pelo sistema de inspecao visual.

Agora finalmente efetuaremos o ensaio para peça com o 2. tipo de falha. Utilizando o mesmo programa de contorno efetuamos um deslocamento de posicao da peça para obtermos trajetoria de contorno passando pelas falhas, como ilustra a figura 3.4. Obtivemos entao o grafico de 3.4 notando-se a resposta do foto-sensor para duas falhas de dimensoes diferentes como se observa no grafico em questao.

PEÇA PERFEITA

PEÇA COM
FALHA POR
QUEBRA DE
FERRAMENTA

PEÇA COM
FALHA POR
MÁ OPERAÇÃO

ILUSTRAÇÃO DE CONTORNO DAS PEÇAS PARA
ENSAIO DE COMPONENTE MECÂNICO.

FIG. 3.3

RESPOSTA DO FOTO-SENSOR PARA INSPEÇÃO DE PEÇA PERFEITA.

GRÁFICO 3.2

RESPOSTA DO FOTO-SENSOR PARA INSPEÇÃO DE PEÇA SUJEITA À FALHA POR QUEBRA DE FERRAMENTA.

GRÁFICO 3.3

DESLOCAMENTO DA PEÇA EM RELAÇÃO À TRAJETÓRIA
PARA INSPEÇÃO DEVIDO À FALHA DE OPERAÇÃO.

FIG. 3.4.

RESPOSTA DO FOTO-SENSOR PARA INSPECÇÃO DE PEÇA SUJEITA À FALHA DEVIDO À OPERAÇÃO.

FIGURA 3.4

6.3.2 - INSPEÇÃO DE UMA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

6.3.2.1 - Descrição do Sistema Utilizado

Utilizando o mesmo sistema de detecção da figura 3.1 montamos uma placa de circuito impresso sobre a mesa do PPP. Fazendo com que o feixe de Laser incida perpendicularmente a placa de circuito impresso fizemos um posicionamento do Laser em cada furo da placa de circuito impresso, para uma região de demonstração. (figura 3.5). O ensaio mostrará a obstrução, se houver, em furos (da placa de circuito impresso) pela quebra ou defeito da ferramenta. Caso esteja perfeita, a placa, através dos furos desobstruídos permitira a passagem do feixe de Laser comprovando sua perfeição.

MONTAGEM PARA INSPEÇÃO DE PLACA
 DE CIRCUITO IMPRESSO.

FIG. 35

6.3.2.2 - Resultados Obtidos

Conectando-se o sinal do foto detector ao registrador grafico poderemos observar o resultado dos ensaios.

Colocando-se uma placa de circuito impresso perfeita sobre o PPP e com a incidencia do Laser sobre a mesma, com o posicionamento em uma sequencia de furos obtivemos o grafico 3.5; note-se que um pulso de largura maior indica a mudanca da direcao de deslocamento da sequencia de furos.

Colocamos agora uma etiqueta que simula obstrucao de furos e repetimos o posicionamento, observamos no grafico 3.6 o pulso de maior largura ocupando o espaco de pulsos que indicavam furos desobstruidos.

RESPOSTA DO FOTO-SENSOR DA INSPEÇÃO DA PLACA DE PROTEÇÃO IMBUIÇÃO PERFEITA.

GRÁFICO 3.5

RESPOSTA DO FOTO-SENSOR PARA INSPEÇÃO DE PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DEFEITUOSA.

GRÁFICO 3.6

6.4 - CONCLUSÕES

Em adicao as conclusoes da tese consideramos que o sistema de inspecao visual automatica visual automatica com posicionamento plano de precisao e uma ferramenta util e economica para controle de qualidade industrial. Atraves dele e possivel, com baixo investimento em equipamentos, obter sensoriamiento de precisoes elevadas, nao disponiveis em sistemas convencionais de inspecao visual, atraves de cameras devido a pequena resolucao do "pixel" e alto custo da quantidade do processamento e memoria necessarios.

Os exemplos apresentados sao simulacoes de problemas industriais reais, onde a inspecao automatica deve atingir niveis de precisao e rapidez que permitam seu uso de maneira eficaz e economica.

Instalando-se o sistema em uma Linha de Fabricacao, e aplicando-se um manipulador de baixo custo para colocacao e retirada de pecas no sistema de inspecao o controle de qualidade podera ser feito de forma eficiente com selecionamento de componentes perfeitos e defeituosos.

Ainda serao possiveis outros tipos de inspecao utilizando-se sensores adequados a necessidade em questao tais como sensores ultrasonicos ou por reflexao ao inves de interrupcao de feixe.

7- CONCLUSÕES

As rigorosas precauções tomadas na elaboração do projeto e na realização do sistema permitiram o desenvolvimento de um PPP de alta precisão e versatilidade de varredura. Isto possibilita inúmeras aplicações em inspeção visual automática.

O sistema suplanta o método de inspeção visual, baseado em câmera, que praticamente era o único que proporcionava precisão mas necessitava, para tanto, de uma programação complexa.

O PPP que desenvolvemos permite a detecção de contornos e trincas com precisão micrométrica o que as câmeras de imagens e monitores, mesmo de boa qualidade, não conseguem alcançar principalmente devido aos problemas de focalização do feixe eletrônico explorador de imagens.

O PPP possui a vantagem de ocupar pequena quantidade de memória (ordem de 64K) graças a simplicidade da programação necessária. Essas características de precisão, versatilidade na varredura e simplicidade da programação constituem pontos fortes que destacam o valor do sistema.

Uma característica importante do PPP é a facilidade de definir contornos que possam ser seguidos para execução do trabalho de verificação de qualidade de peças. Enquanto que a precisão da varredura possibilita, entre outras coisas, a detecção de trincas micrométricas não passantes que são entadonhas de ser percebidas por outros meios (como por exemplo a visão humana descansada).

Nota-se que o sistema robutez que permite seu uso em condições facilmente obteníveis em instalações industriais. "e também importante observar que além da facilidade de definição de contornos o PPP permite armazená-los em discos flexíveis o que possibilita um tempo de "set-up" extremamente reduzido.

Ainda analisando as perspectivas de aplicação do sistema desenvolvido surge toda uma gama de possibilidade que são normalmente atendidas por digitalizadores. Estes se estendem pelas áreas de químicas, biologia, medicina e etc.

No caso da digitalização a precisão do deslocamento é a característica de maior importância. Dentre os sistemas examinados, os que trabalham com tambores sofrem erros de paralaxe enquanto que os de mesa plana sofrem de lentidão na operação e ambos sofrem de falta de versatilidade na realização da digitalização.

De fato nenhum sistema comercial ou encontrado na literatura é capaz de variação de percurso, velocidade, espaçamento entre pixels ou mudança no tamanho do pixel no decorrer da digitalização. Isto tudo considerado garante que o sistema desenvolvido constitui umpossante instrumento de digitralização.

Do ponto de vista da fabricação de placas de circuitos impressos multicamadas do PPP pode ser aplicado para confecção precisa dos contornas das trilhas, onde, com "platadores" convencioansi depara-se com precisão de "plotagem" já que a superposição torna-se cada vez mais rebuscada com a diminuição das dimensões de componentes e o aumento da densidade de interligações no circuito.

Diante dos argumentos acima alinhados ficam claros os aspectos de revelância e originalidade apresentados pelo sistema desenvolvido.

- PERSPECTIVAS DE PESQUISAS FUTURAS

Com a adaptação dos sensores abrem-se inúmeras perspectivas para novas aplicações, bastando dar largas à imaginação para concretizá-las.

Por exemplo, um sensor ultrassônico para detectar com precisão bolhas e falhas de não homogeneidade internas em materiais.