

Yusuke Takahashi

**Método para recuperação  
de formas de objetos**

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

Área de Concentração: Engenharia Mecânica

Orientador : Prof. Oswaldo Horikawa

São Paulo

1997



## Tabela de conteúdo

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	8
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	13
<b>2. PRINCÍPIO.....</b>	<b>14</b>
2.1 MÉTODO DO OBJETO EM ROTAÇÃO PARA RECUPERAÇÃO DA FORMA .....	14
2.2 MÉTODOS CONVENCIONAIS .....	20
2.2.1 Método 1: Medida simultânea de forma e reflectancia pela rotação do objeto .....	20
2.2.2 Método 2: Recuperação de objeto com forma densa em rotação por escolha ponderada.....	25
2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	28
<b>3. MÉTODO DE DOIS PONTOS SIMÉTRICOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 HIPÓTESES .....	29
3.2 O MÉTODO.....	31
3.3 A UNICIDADE DA SOLUÇÃO.....	34
3.4 RECUPERAÇÃO DA FORMA PELO CÁLCULO DO VETOR NORMAL DA SUPERFÍCIE.....	35
3.5 CÁLCULO DO FATOR DE REFLECTÂNCIA .....	36
3.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	37
<b>4. AVALIAÇÃO DO MÉTODO.....</b>	<b>39</b>
4.1 AVALIAÇÃO DO MÉTODO ATRAVÉS DE EPI SIMULADA .....	39
4.1.1 Simulação de EPI.....	40
4.1.2 Recuperação de forma pela identificação da trajetória senoidal.....	41
4.1.3 Recuperação de forma através de vetor normal.....	42
4.1.4 Simulação sob condições variadas .....	43
4.2 AVALIAÇÃO DO MÉTODO ATRAVÉS DE EPI OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE .....	48
4.2.1 Componentes utilizados no arranjo experimental .....	48
4.2.2 Arranjo Experimental .....	49
4.2.3 Testes preliminares .....	50
4.2.4 Método experimental .....	55
4.2.5 Resultados experimentais.....	56
4.2.6 Recuperação da parte com reentrâncias;.....	60
4.2.7 Tempo de Processamento.....	73

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	75
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>82</b>

## Índice de figuras

FIG.1.1: MÉTODOS DE RECUPERAÇÃO DA FORMA .....	8
FIG.2.1: SISTEMA DE PROJEÇÃO .....	14
FIG.2.2: PROJEÇÃO DO OBJETO EM ROTAÇÃO.....	15
FIG.2.3: MÚLTIPLAS IMAGENS ALINHADAS NO EIXO DE TEMPO.....	16
FIG.2.4: IMAGENS SUCESSIVAS DA PROJEÇÃO DE UM PONTO DE UM OBJETO EM ROTAÇÃO .....	17
FIG.2.5 : REPRESENTAÇÃO DE UM PONTO DA EPI EM COORDENADAS POLARES .....	18
FIG.2.6 : TRAJETÓRIAS DE 4 PONTOS NA EPI .....	19
FIG.2.7 : RECUPERAÇÃO DA FORMA COMPLETA DO OBJETO.....	19
FIG.2.8: ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O MÉTODO 1 .....	20
FIG.2.9 :CILINDRO COM QUATRO FAIXAS .....	21
FIG.2.10: EPI SIMULADA E OS PONTOS RECUPERADOS .....	22
FIG.2.11: VECTOR NORMAL E VECTOR DE FONTE DE LUZ.....	23
FIG.2.12 :CALCULO DE VECTOR NORMAL E FATOR DE REFLECTÂNCIA DE EPI .....	24
FIG.2.13:ARRANJO EXPERIMENTAL PARA O MÉTODO 2 .....	25
FIG.2.14:CILINDRO COM A REFLECTÂNCIA QUE VARIA GRADUALMENTE .....	26
FIG.2.15: A EPI SIMULADA E O RESULTADO RECUPERADO .....	27
FIG.3.1: VISTA SUPERIOR DO SISTEMA .....	29
FIG.3.2: VISTA LATERAL DO SISTEMA .....	30
FIG.3.3: ARRANJO DOS ÂNGULOS .....	30
FIG.3.4: TRAJETÓRIA DO PONTO $P_C$ NA EPI .....	31
FIG.3.5: SIMULAÇÃO DE EPI DE UM CILINDRO COM FACE PLANA .....	35
FIG.3.6 :COMPONENTE VERTICAL ANGULAR DO VECTOR NORMAL $\varphi$ .....	37
FIG.4.1: CONFIGURAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE EPI.....	40
FIG.4.2: EPI SIMULADA DE UM CILINDRO.....	41
FIG.4.3: RESULTADOS DA RECUPERAÇÃO DE FORMA A PARTIR DA IDENTIFICAÇÃO DA TRAJETÓRIA SENOIDAL .....	42
FIG.4.4: RESULTADOS DA RECUPERAÇÃO DE FORMAS ATRAVÉS DE VETORES NORMAIS .....	43
FIG.4.5 : CONDIÇÕES VARIADAS PARA SIMULAÇÃO .....	44
FIG.4.6 : EPIS DOS QUATRO CASOS .....	45
FIG.4.7: RESULTADOS DA RECUPERAÇÃO DE FORMA .....	46
FIG.4.8: A FOTO DA MESA GIRATÓRIA.....	49
FIG.4.9 : ESTRUTURA DA MESA .....	49
FIG.4.10: ARRANJO EXPERIMENTAL.....	50
FIG.4.11: OBJETO CILÍNDRICO (GARRAFA DE COCA-COLA) .....	51
FIG.4.12: IMAGEM OBTIDA DO OBJETO.....	52
FIG.4.13 : CURVAS DE INTENSIDADE REFLETIDA SOB LUZ PARALELA EXPERIMENTAL E TEORÉTICA.....	53

FIG.4.14: RUÍDO DA CÂMERA .....	54
FIG.4.15: FORMAS RECUPERADAS CONSIDERANDO O RUÍDO .....	54
FIG.4.16: EPI DE CILINDRO(ALTURA = 60 PIXEL) .....	55
FIG.4.17: EPI DE CILINDRO COM REENTRÂNCIAS (ALTURA = 200 PIXEL) .....	56
FIG.4.18: RECUPERAÇÃO DE FORMA CILÍNDRICA EXPERIMENTAL .....	57
FIG.4.19: DELTA ALPHA VS. RAIOS CALCULADO E EXPERIMENTAL .....	58
FIG.4.20: DELTA ALPHA VS. RAIOS CALCULADOS SIMULADO .....	59
FIG.4.21: ERROS ENTRE AS FORMAS EXPERIMENTAL E TEÓRICA .....	59
FIG.4.22: RECUPERAÇÃO DE FORMA COM REENTRÂNCIAS .....	60
FIG.4.23: ALTURA PARA RECUPERAR MULTE IMAGEM .....	61
FIG.4.24: AS FORMAS RECUPERADAS EM DIFERENTES ALTURAS .....	63
FIG.4.25: A GARRAFA RECUPERADA COM $\Delta\alpha=72^\circ$ NA MULTE IMAGEM .....	63
FIG.4.26: OBJETO COM 2 CORES.....	64
FIG.4.27: EPI DO OBJETO COM 2 CORES.....	64
FIG.4.28: FORMA RECUPERADA DO OBJETO COM 2 CORES .....	65
FIG.4.29: OBJETO DESLOCADO DO CENTRO DE ROTAÇÃO.....	66
FIG.4.30 : EPI DO OBJETO DESLOCADO DO CENTRO .....	66
FIG.4.31: A FORMA RECUPERADA DO OBJETO .....	66
FIG.4.32: OBJETO COM FORMA COMPLEXA E A SEÇÃO TRANSVERSAL A SER RECUPERADA.....	67
FIG.4.33: EPI DO OBJETO COMPLEXO.....	68
FIG.4.34:A FORMA RECUPERADA COM $\Delta\alpha=72^\circ$ .....	68
FIG.4.35: MUDANÇA DE INTENSIDADE DO CENTRO DA EPI .....	69
FIG.4.36: DOIS PONTOS QUE FICAM ESCONDIDOS DURANTE A ROTAÇÃO.....	69
FIG.4.37 CASO DO PONTO VISÍVEL SOMENTE NO SEMI-PLANO ESQUERDO .....	70
FIG.4.38 CASO DO PONTO VISÍVEL SOMENTE NO SEMI-PLANO DIREITO .....	71
FIG.4.39: A FORMA RECUPERADA E SEÇÃO TRANSVERSAL .....	73
FIG.7.1: CIRCUITO REGULADOR .....	82
FIG.7.2 : CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DO MOTOR DE PANO .....	82
FIG.7.3 : MOTOR DE PANO.....	83

## Resumo

A recuperação de forma de objetos através de processamento de imagem apresenta a grande vantagem de permitir um sistema simples e versátil. Dentre os métodos desta categoria existe um grupo conhecido como Rotating Object Method (método do objeto em rotação) que permite uma recuperação ainda mais simples, exigindo somente uma câmera e uma fonte de luz. Este método consiste basicamente em analisar a trajetória dos pontos do objeto, em sucessivas imagens obtidas com o objeto em rotação. Estudos anteriores foram feitos a respeito deste método mas todos se baseavam na obtenção de trajetórias facilmente identificáveis, mesmo através da visão humana. O presente trabalho vem então propor um novo método para, valendo-se da capacidade de uma câmera de vídeo e um computador identificar com grande precisão as variações de intensidade luminosa, identificar a trajetória através de um modelo matemático de previsão de variação de intensidade conforme a rotação e a forma do objeto. Diferente dos métodos já propostos, este método requer somente a difusão perfeita da luz na superfície do objeto e a utilização de iluminação com raios paralelos, permitindo em tese a medição de objetos com reentrância e objetos sem pontos de fácil identificação. O método foi avaliado através de simulação e através de experimento. Em ambos os casos são utilizadas desde situações mais simples, como um cilindro girando em torno de seu eixo, a diversas outras situações mais complexas. Os resultados da simulação e dos experimentos se mostraram satisfatórios validando o método. No caso mais simples de recuperação de forma de uma porção cilíndrica de um objeto, chegou-se a um erro máximo de 1,1mm para um raio próximo de 35mm. Nos caso mais complexos não se chegou a avaliar a precisão devido aos erros. Contudo em todos os casos a forma básica dos objetos foram bem identificados e os principais problemas que prejudicam a precisão da recuperação são discutidos.

## Abstract

Recovering shape of objects through image processing presents great advantage in providing small and versatile system. Among some methods in this category, exists a group known as Rotating Object Method which allows more simple recovering and demands only one camera and one light source. This method consists basically of analysis of traces of points of object on successive images taken from the rotating object. Previous studies have been done as to this method but all of them were based on trace obtainment through easy identification even through human vision. The present research proposes new method. It makes use of a video camera and a computer's capacity for identify variation of intensity with good precision and identifies trace through estimation of intensity variation by mathematical model according to rotation and shape of the object. Different from the methods already proposed, this method requires only perfect diffuse of light on surface of objects and use of parallel light source. It allows recovering of objects with dents and objects without easy-to-found points in theory. The method is verified through simulations and experiments. In both cases, from a case of a cylinder rotating around its axis to more complex case are used. The simulational and experimental results show satisfactory verification of the method. In the most simple case of shape recovering of a portion of cylindrical object, max error reached up to 1.1mm for a radius close to 35mm. In case of more complex shape, verification didn't come up to precision due to errors. However in all of cases the basic shape of objects were well identified and the principal problems which damages the precision of recovering are discussed.

# 1. Introdução

## 1.1 Motivação

Recentemente, com o aumento das necessidades de computação gráfica, multi-mídia e visão robótica destinados a sistemas de automação, surgiu e cresceu a necessidade por um método para uma fácil recuperação da forma geométrica, ou seja, obtenção de informações relativas a formas geométricas de objetos em geral.

Há muitos métodos para recuperação de forma, conforme mostrado na Fig.1.1

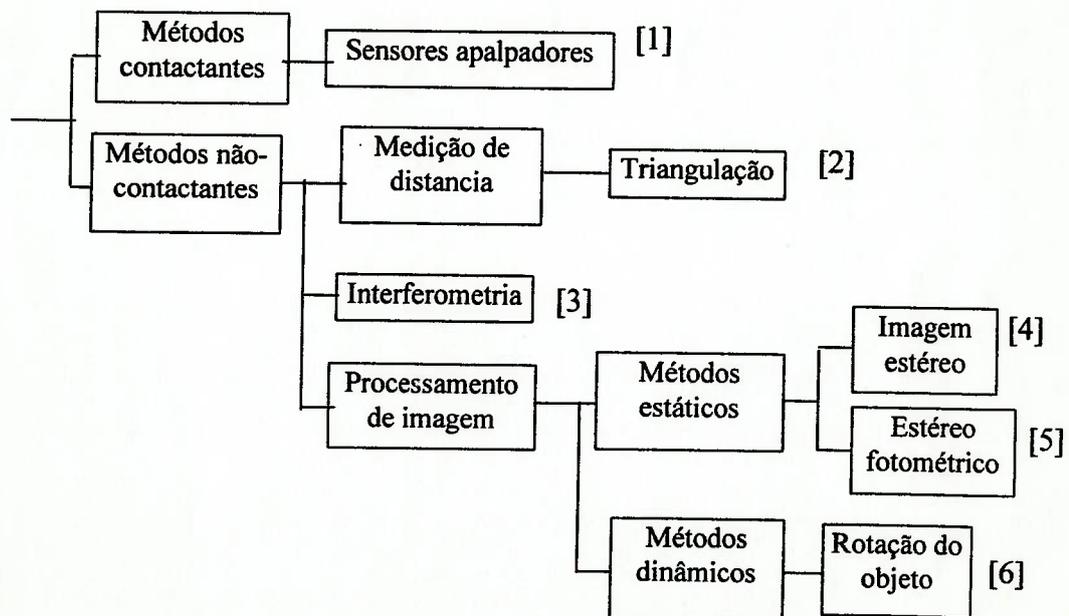


Fig.1.1: Métodos de recuperação da forma

Métodos contactantes;

Um grupo de métodos convencionalmente usados na recuperação da forma é o que se utiliza de sensores de contato. Através desses métodos, a forma do objeto pode ser medida diretamente e com precisão relativamente elevada<sup>[1]</sup>, sendo essa a sua principal vantagem. Mesmo em se tratando de precisão, os métodos contactantes permitem atingir precisões relativamente elevadas, existindo propostas de metodologias para assegurar elevadas precisões como fizeram. Entretanto, o sistema de sensoreamento, incluindo o sensor de contato, deve estar próximo ao objeto. Além disso, quando são usados os sistemas de sensoreamento de contato, as informações sobre o fator de reflectância não podem ser medidas. Portanto, características da superfície do objeto, como textura e padrões (como por exemplo uma estampa impressa na superfície do objeto) não podem ser detectadas.

#### **Métodos não-contactantes;**

Por outro lado, existe o grupo de métodos de recuperação de forma de sem-contato, sendo que a maioria deles utiliza métodos de medição óptica. Os métodos de sem-contato podem ser divididos em três subgrupos.

#### **Medição de distância;**

Um é o grupo de métodos para medição de distâncias. O método da triangulação é um exemplo desse subgrupo. Nesse método, um feixe de luz é emitido numa determinada direção sobre uma superfície e o ponto de reflexão é observado por um sistema óptico. A partir (a) da posição apontada que é observada no sistema óptico, (b) da distância entre a fonte do feixe luminoso e o sistema óptico e (c) da direção do feixe, calcula-se a posição apontada na superfície do objeto. Fazendo a varredura do feixe em toda a superfície do objeto, obtém-se a forma total do objeto. Outro método que propõe a utilização de luz estruturada também é baseado neste princípio<sup>[2]</sup>. A grande dificuldade neste grupo de métodos é o controle da direção do feixe de luz, uma tarefa complexa que requer um sistema especial.

#### **Interferometria;**

Outro importante subgrupo é o dos métodos de interferometria, nos quais um objeto é iluminado por uma fonte de luz coerente, obtendo-se um padrão de interferência (um

conjunto de franjas). Analisando-se esse padrão, recupera-se a forma do objeto<sup>[3]</sup>. A dificuldade de aplicar esse método é que ele requer a conversão dos padrões para as informações de forma. Outra desvantagem é que ele requer que o objeto tenha uma superfície perfeitamente espelhada e lisa.

### **Processamento de imagens;**

A recuperação da forma também pode ser feita através de outro subgrupo de métodos, o processamento de imagens. A maior vantagem desse grupo de métodos é a simplicidade do sistema. Normalmente, nos métodos desse grupo, uma câmera de vídeo (por exemplo uma câmera CCD) é usada para fazer a aquisição de múltiplas imagens do objeto, em condições distintas e conhecidas. Analisando-se as imagens, extraem-se as informações sobre a posição dos pontos da superfície de um objeto. Esse subgrupo de processamento de imagem pode ser dividido em duas categorias: um é o de processamento de imagens estático e o outro é o de processamento de imagens dinâmico.

### **Método estático;**

O método estático lida com imagens independentes do tempo, o que significa que o processamento de imagens não requer informações sobre o tempo. Por outro lado, o método dinâmico trata imagens dependentes do tempo, o que significa que as informações temporais das imagens é essencial no processamento de imagens. Alguns exemplos de métodos estáticos são as imagens estéreo e os métodos de fotometria estéreo.

### **Imagem estéreo;**

O método de imagem estéreo requer múltiplas imagens de câmeras diferentes, cada uma direcionada para o objeto em uma direção diferente. Usando-se essas imagens e conhecendo-se a posição relativa entre as câmeras, a posição dos pontos na superfície do objeto é calculada. Na análise das imagens, um ponto que aparece em uma imagem precisa ser identificado nas outras imagens. Isso não é uma tarefa direta, consistindo na maior desvantagem desse método.

### **Fotometria estéreo;**

Neste método, a direção de visualização é constante. Múltiplas imagens são obtidas variando-se a direção da iluminação incidente. Analisando-se essas imagens, obtém-se a orientação da superfície em cada ponto da imagem, obtendo-se portanto a forma do objeto. Uma desvantagem desse método é o fato de requerer o uso de, no mínimo, três direções de iluminação e a direção da iluminação deve ser conhecida para determinar a orientação da superfície. A principal vantagem da recuperação da forma por processamento de imagens estático, é a de que apenas poucas imagens são suficientes para recuperar a forma do objeto.

### **Método de dinâmico;**

Um método de processamento de imagens dinâmico que utiliza uma câmera de vídeo foi proposto recentemente. Nesse método, um objeto é colocado sobre uma mesa giratória e colocada em rotação a uma velocidade constante. São obtidas imagens sucessivas durante uma rotação de 360°. Analisando-se essas imagens, que contêm informações temporais, a forma do objeto é recuperada. Diferente dos demais métodos citados até aqui, este método (chamado de Rotating Object Method - método de objeto em rotação) permite a recuperação da forma total do objeto, sem tocar no objeto, através de um processamento de imagem mais simples comparada ao método da imagem estéreo e através de iluminação mais simples. O método requer o uso de uma única câmera e uma fonte de luz. Sucessivas imagens são obtidas do objeto em rotação a uma velocidade constante. De cada imagem, é extraído um trecho em forma de faixa, a uma altura constante. Tais trechos de imagens são agrupadas para compor a EPI (Epipolar Plane Image) que é analisada e utilizada para recuperar a forma do objeto. Este método foi proposto primeiramente por Jiang Yu Zheng<sup>[6]</sup>, que realizou a recuperação da forma através da análise dos contornos do objeto na EPI. Apesar de ter demonstrado a eficácia, o método se mostrou ineficaz para objetos com reentrâncias. Já, Inokuchi et al<sup>[7]</sup> e Okutomi et al<sup>[8]</sup>, propuseram a recuperação da forma através

da identificação da trajetória que cada ponto descreve nas EPIs. O trabalho de Inokuchi et al<sup>[7]</sup>, assume a existência de pontos peculiares no objeto, de tal sorte que a trajetória dos pontos pode ser facilmente identificada na EPI. Apesar de simples, o método não é eficaz no caso de objetos com formas suaves ou com reflectância uniforme. Já o trabalho de Okutomi et al<sup>[8]</sup>, propõe que o objeto seja iluminado de tal forma que qualquer ponto do objeto apresenta uma intensidade constante ao longo de toda a trajetória na EPI. Este método, apesar de possibilitar a recuperação de forma de objetos com reflectância não-uniforme, deixa de ser eficaz quando a reflectância é uniforme.

A grande característica dos métodos propostos nos dois últimos trabalhos citados é o fato dos mesmos exigirem a existência de pontos com trajetórias bem visíveis e identificáveis ao olho humano, acabando por restringir o universo de objetos cujo formato poderão ser recuperados. Contudo a existência de trajetórias bem visíveis nem sempre é necessária. Desde que a aquisição e o processamento das imagens poderá ser feito por uma câmera de vídeo e um computador, pequenas mudanças de intensidade de luz refletida pelo objeto de rotação poderão ser detectadas facilmente. Tendo-se além disso um modelo matemático que permita prever a mudança de intensidade conforme a rotação e a forma do objeto, é possível recuperar a forma somente com base na variação da intensidade nos diversos pontos da EPI.

## **1.2 Objetivos**

Com base no raciocínio acima apresentado, o presente trabalho terá como objetivo:

a) estudar um novo método recuperação de forma de objeto por rotação, através de identificação de trajetória dos pontos na EPI por meio da análise de variação de intensidade de luz refletida por um ponto do objeto.

- b) com relação a este método proposto, demonstrar a sua validade e avaliar a sua eficácia através de simulação e experimentos.

### **1.3 Organização da Dissertação**

Esta dissertação é constituído com 5 capítulos.

- Capítulo 1: apresenta a revisão dos métodos para recuperar formas, expondo as vantagem e desvantagem de cada método, identificando possibilidades de melhorias e propondo o presente trabalho.
- Capítulo 2: apresenta o principio básico do método do recuperação do objeto em rotação e para viabilizar este método, dois outros métodos já propostos por outros autores. Serão discutidas as vantagens e as limitações em cada caso.
- Capítulo 3: apresenta o método proposto, apresentando as hipóteses necessárias, a formalização do método e o algoritmo para a implementação do método. Será apresentada uma forma alternativa de recuperação de forma, através de vetores normais.
- Capítulo 4: será feita uma avaliação do método proposto através de simulações e experimentos. Serão considerados na avaliação, diversos tipos de objetos, desde o mais simples (um cilindro) até os casos mais complexos. Com base nos resultados será demonstrada a validade do método proposto, será discutida a precisão do método e serão discutidos os principais fatores que limitam o desempenho deste método.
- Capítulo 5: serão apresentadas as principais conclusões e propostos temas para trabalhos futuros.

## 2. Princípio

### 2.1 Método do Objeto em Rotação para Recuperação da Forma<sup>[7]</sup>

Considere um objeto sendo observado por uma câmera de vídeo na Fig.2.1. Um sistema de coordenadas ortogonais  $(x-y-z)$  é fixo ao objeto e outro,  $(x_c-y_c-z_c)$ , é fixo à tela da câmera. O sistema  $(x_c-y_c-z_c)$  tem seus eixos paralelos aos de  $(x-y-z)$ . Supõe-se aqui que o tamanho do objeto observado é suficientemente pequeno comparado à distância de observação - distância entre  $y$  e  $y_c$ , de modo que a projeção em perspectiva pode ser aproximada a uma projeção ortográfica.

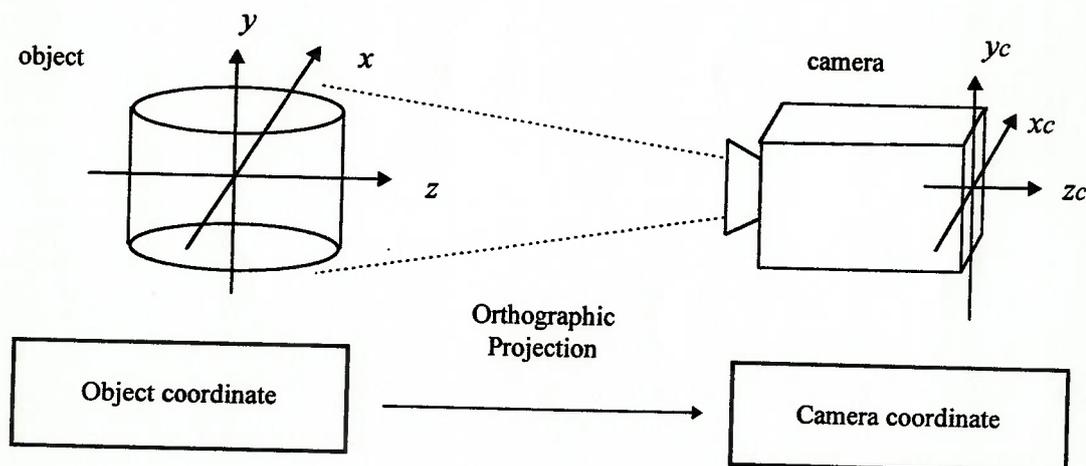
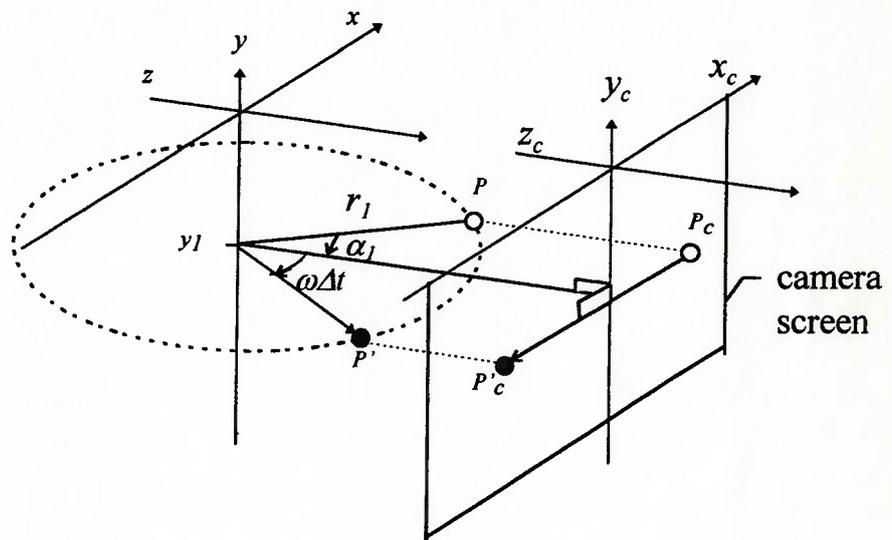


Fig.2.1: Sistema de projeção

Qualquer ponto  $P$  da superfície do objeto é projetado paralelamente ao eixo  $z$ , em  $P_c$  no plano  $x_c-y_c$ . O ponto projetado é chamado de  $P_c$ .

Quando o objeto gira em torno do eixo  $y$  a uma velocidade angular  $\omega$  constante, o ponto projetado  $P_c$  irá descrever uma linha reta no plano  $x_c-y_c$ , conforme a Fig.2.2. Ou seja,

quando o objeto gira de um ângulo  $\omega\Delta t$ , o ponto  $P(\alpha_1, r_1, y_1)$ , descrito agora em coordenadas cilíndricas, se move para a nova posição  $P'(\alpha_1 + \omega\Delta t, r_1, y_1)$ . Concomitantemente, o ponto projetado move-se de  $P_c(r_1 \sin(\alpha_1), y_1)$  para a nova posição  $P'_c(r_1 \sin(\alpha_1 + \omega\Delta t), y_1)$  nas coordenadas  $x_c - y_c$ . O movimento circular nas coordenadas cilíndricas é projetado como movimento linear nas coordenadas  $x_c - y_c$ .



**Fig.2.2: Projeção do objeto em rotação**

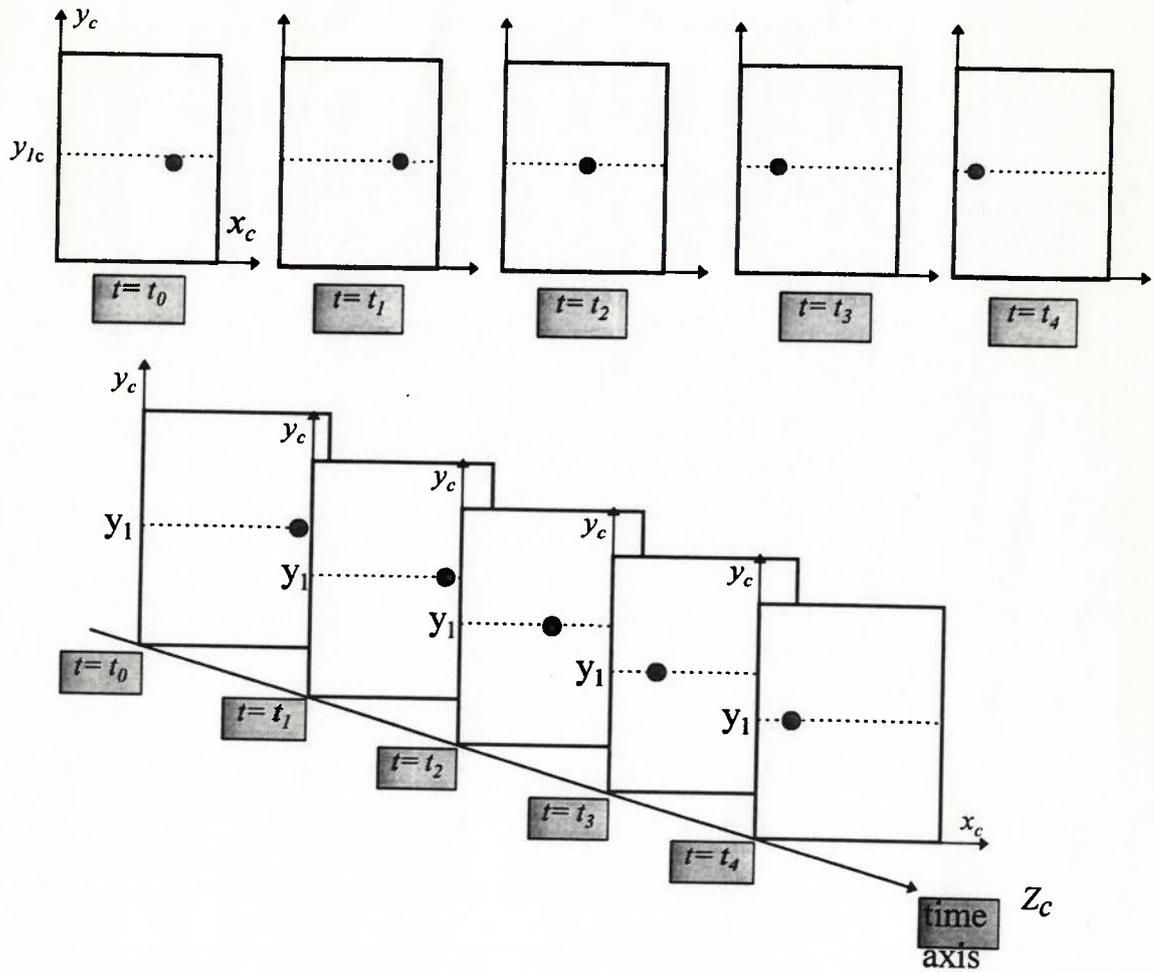
Assim, a posição genérica do ponto projetado  $P_c$  é dado por:

$$\begin{cases} x_c = r_1 \sin(\alpha_1 + \omega \cdot t) \\ y_c = y_1 \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

Como  $\alpha_1$ ,  $r_1$  e  $y_1$  são constantes (eles representam a posição inicial do ponto  $P$ ),  $x_c$  é função somente de  $t$ . Já por outro lado,  $y_c$  é constante, ou seja um ponto sempre permanece numa mesma altura no plano projetado durante a rotação.

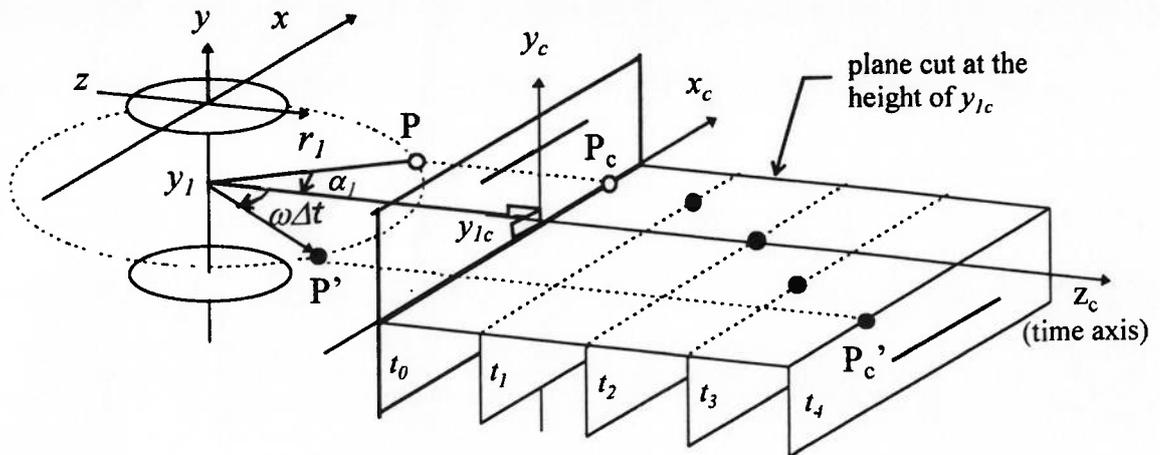
Enquanto o objeto gira, a câmera coleta a imagem projetada a cada intervalo fixo de tempo. Depois de uma volta completa do objeto, tem-se uma seqüência de imagens que podem ser organizadas ao longo de eixo de tempo. Aqui este eixo do tempo pode ser

virtualmente considerado como sendo terceiro eixo do espaço (eixo  $z_c$ ) conforme ilustra a Fig.2.3.



**Fig.2.3: Múltiplas imagens alinhadas no eixo de tempo**

Desta forma, o movimento  $P$  pode ser gravado na forma de informação 3D ( $x_c$ - $y_c$ - $z_c$ ) como mostra a Fig.2.4.



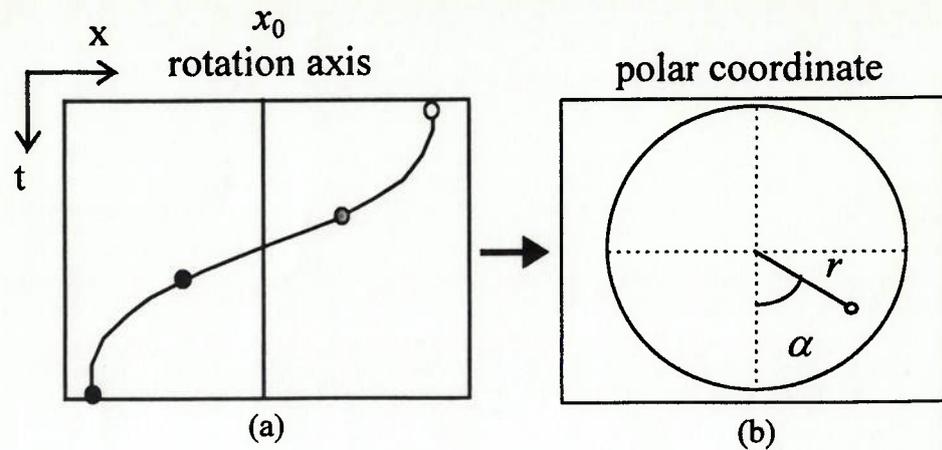
**Fig.2.4: Imagens sucessivas da projeção de um ponto de um objeto em rotação**

O plano  $(x_c-z_c)$  à altura  $y_{lc}$  é chamado de “Epipolar Plane Image (imagem de plano epipolar), ou simplesmente EPI. Na EPI, uma trajetória de qualquer ponto da superfície do objeto à altura  $y_l$ , descreve uma curva senoidal, desde que a velocidade de rotação  $\omega$  seja constante. Isto ocorre mesmo que algumas partes da trajetória não possam ser vistas, quando o ponto escondido vai para trás do próprio objeto enquanto gira.

A Fig.2.5(a) mostra um exemplo de EPI de um ponto. Nesta EPI, o eixo horizontal  $x$ , representa a posição horizontal da projeção e o eixo vertical  $t$ , o tempo. Na EPI, qualquer pode ser expressa pela Eq.(2).

$$x = x_0 + r \cdot \sin(\omega \cdot t - \alpha) \dots\dots(2)$$

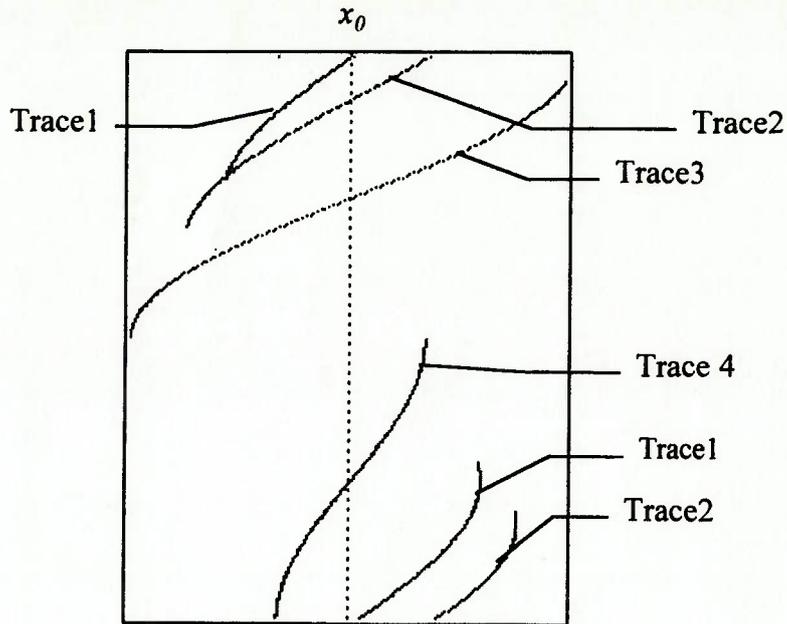
Onde  $r$  e  $\alpha$  representam respectivamente a amplitude e a fase da curva senoidal. Em coordenadas polares, estes parâmetros representam a posição inicial do ponto como indica a Fig.2.5(b).



**Fig.2.5 : Representação de um ponto da EPI em coordenadas polares**

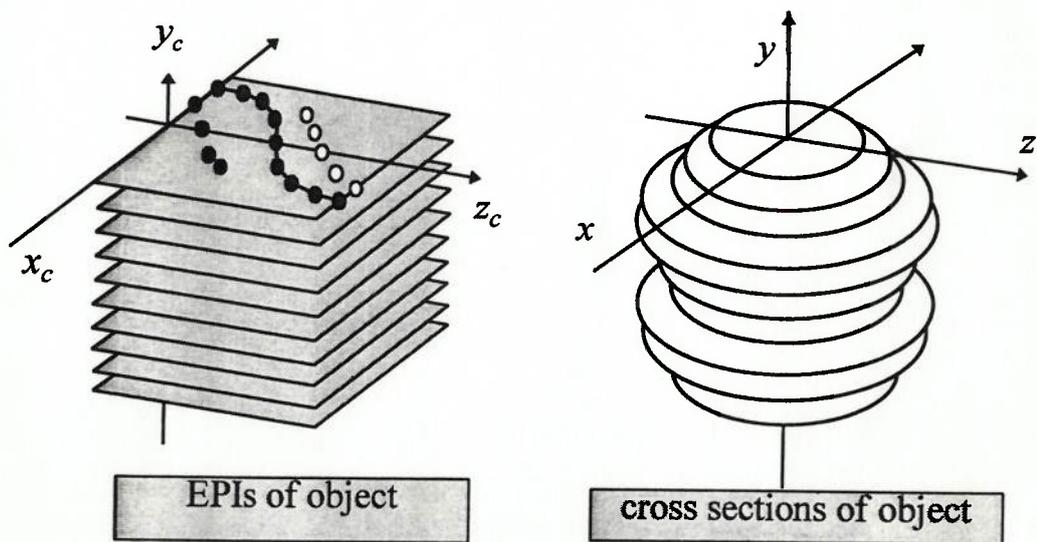
Determinando a partir da EPI, o valor de  $r$  e de  $\alpha$  para uma dada curva senoidal, e sabendo o valor de  $x_0$  e  $\omega$  da configuração inicial, a posição inicial de qualquer ponto pode ser obtida em coordenadas polares. Realizando este processo para todos os pontos na superfície do objeto, a forma 3D do objeto será recuperada.

A Fig.2.6 é uma EPI obtida por simulação de 4 pontos de um objeto convexo com o eixo de rotação passando em seu interior. Nota-se através deste exemplo que, todos os pontos descrevem uma curva senoidal. Nota-se ainda que, todos os pontos cruzam o eixo de rotação  $x_0$ , e cruzam apenas uma vez durante o período visível de rotação. Assim, se restringirmos a medição somente de objetos convexos com o centro de rotação passando em seu interior, é possível cobrir todos os pontos da seção da superfície do objeto a uma determinada altura, encontrando os parâmetros ( $r$  e  $\alpha$ ) para todos os pontos da EPI ao longo de  $x_0$ .



**Fig.2.6 : Trajetórias de 4 pontos na EPI**

Através deste processo, a forma da seção transversal do objeto poderá ser recuperada através da EPI. A forma 3D completa do objeto poderá ser recuperada, recuperando varias seções transversais, em diferentes alturas na Fig.2.7.



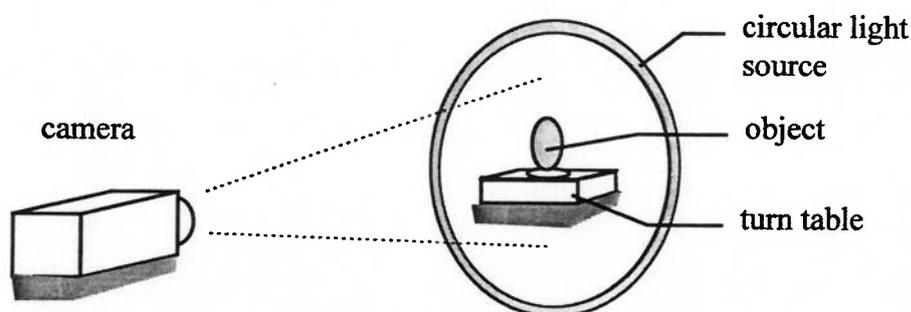
**Fig.2.7 : Recuperação da forma completa do objeto**

## 2.2 Métodos convencionais

O Ítem anterior descreveu a técnica de recuperação de forma através da rotação do objeto. Há ainda no entanto um problema a ser solucionado para a efetiva aplicação do método. Ou seja, há ainda o problema da identificação da trajetória de cada ponto em cada EPI. No exemplo de EPI apresentado no Ítem anterior, somente foram apresentadas as trajetórias de alguns poucos pontos e ainda assim, as trajetórias foram demarcadas de modo a facilitar o entendimento. Numa situação real, haverá uma quantidade muito grande de pontos com aspectos nem sempre distintos. Este Ítem apresentará dois métodos que já foram propostos para a solução deste problema. Cada método será apresentado e serão discutidas as respectivas vantagens e limitações.

### 2.2.1 Método 1: Medida simultânea de forma e reflectancia pela rotação do objeto<sup>[7]</sup>

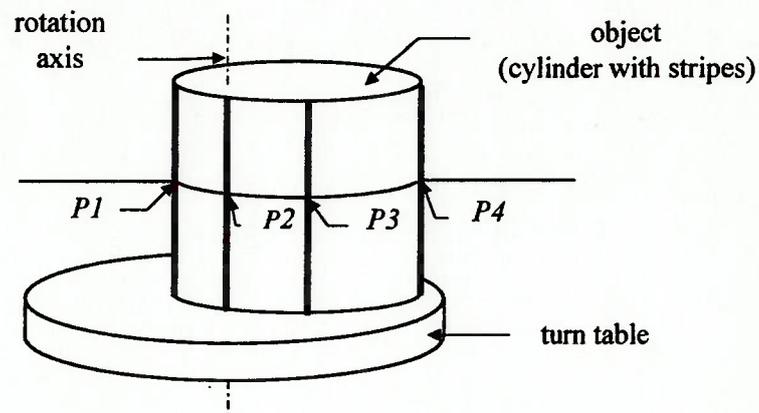
Neste método, um objeto é colocado numa mesa giratória e rotacionada a uma velocidade constante. O objeto é iluminado por uma fonte de luz circular (Fig.2.8).



**Fig.2.8: Arranjo experimental para o Método 1**

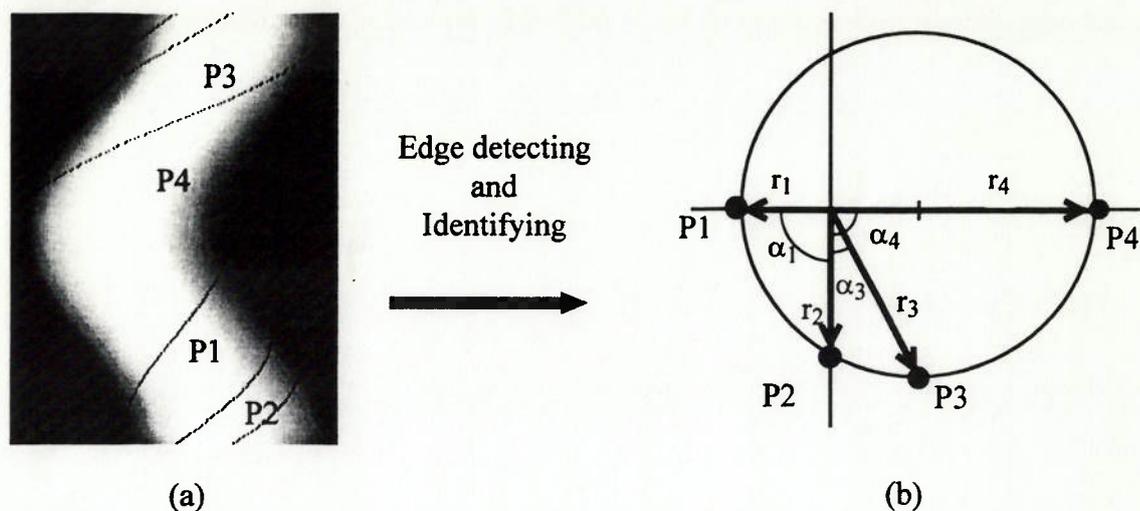
A recuperação da forma é alcançada basicamente analisando-se as trajetórias de pontos peculiares, isto é, de pontos isolados ou pontos nas arestas que tem grande diferença no fator de reflectância comparado aos pontos vizinhos.

Para explicar este método, considere-se um cilindro com quatro faixas desenhadas em sua superfície (Fig.2.9).



**Fig.2.9 :Cilindro com quatro faixas**

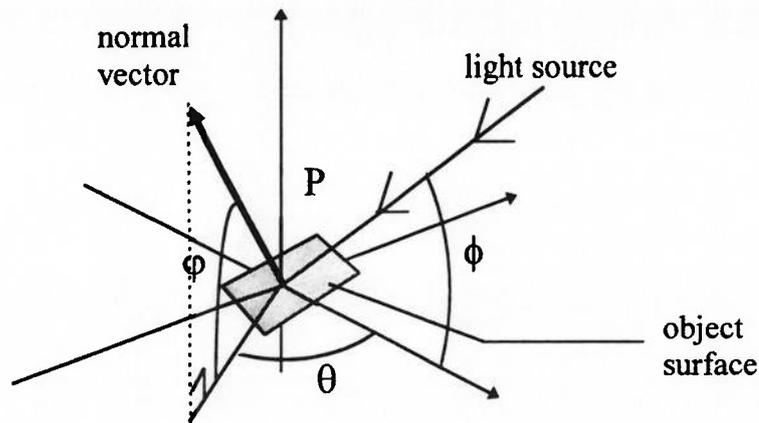
Foi simulada a EPI da seção transversal a uma certa altura. A seção transversal tem quatro pontos peculiares na sua superfície. Estes quatro pontos ( $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$  e  $P4$ ) descrevem as trajetórias na EPI conforme a Fig.2.10(a). Primeiramente estas trajetórias são detectadas por processos de detecção de arestas<sup>[2]</sup>. Então, usando cada aresta detectada, os parâmetros ( $r$  e  $\alpha$ ) são determinados para cada curva senoidal identificada. Finalmente os pontos são recuperados em coordenadas polares como mostra na Fig.2.10(b).



**Fig.2.10: EPI simulada e os pontos recuperados**

Este método também permite que se calcule o vetor normal e o fator de reflectância em cada ponto da superfície do objeto. Estes são calculados utilizando-se as mudanças de intensidade que ocorrem enquanto o objeto gira sob a iluminação de uma fonte de luz circular. Uma suposição também é feita, de que a superfície do objeto proporciona uma difusão perfeita<sup>[5]</sup>.

A superfície de difusão perfeita (*lambertian surface*) é aquela na qual a intensidade da luz refletida é igual em todas direções de visualização, ou seja, o fator de reflectancia é constante independentemente da direção de visualização. Assim, considere-se o modelo de reflexão da luz da fig.2.11, onde um ponto  $P$  tem um vetor normal com componente horizontal  $\theta$ , componente vertical  $\varphi$  e fator de reflectancia  $\xi$ , a luz (raios paralelos) incide segundo um ângulo  $\phi$ .



**Fig.2.11: Vector normal e vector de fonte de luz**

Se a superfície é de difusão perfeita, a intensidade da luz refletida em  $P$  será dada por:

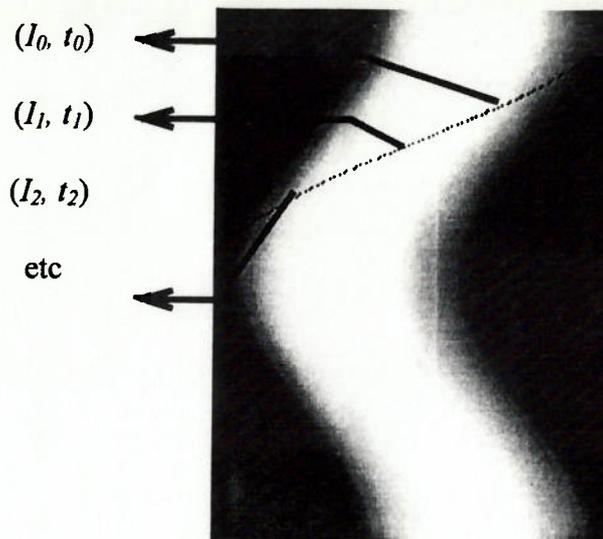
$$I = \xi \cos(\varphi - \phi) \cos(\theta) \dots\dots(3)$$

Já quando se utiliza uma fonte de luz circular, como se faz no presente método, o modelo para intensidade  $I$ , da luz refletida assume a seguinte forma<sup>[7]</sup>:

$$I = \xi K \sqrt{\cos^2 \varphi \cdot \sin^2(\omega \cdot t - \theta) + \sin^2 \varphi} \dots\dots(4)$$

onde  $K$  é um fator constante característico da fonte de luz circular.

Assim, segundo o método, de uma curva senoidal obtida por processos de detecção de arestas, várias combinações de  $I$  e  $t$  são obtidas da EPI (Fig.2.12).



**Fig.2.12 :Calculo de vetor normal e fator de reflectância de EPI**

Para cada combinação, obtemos uma equação da forma Eq.(4). Resolvendo o sistema de equações, obtemos os valores de  $\xi$ ,  $\varphi$  e  $\theta$  e com isso fica determinada a inclinação da superfície em  $P$  com relação à direção de iluminação.

Resumo das características deste método

**Suposições:**

- Uso de fonte de luz circular
- Existência de vários pontos peculiares na superfície.

**Vantagens:**

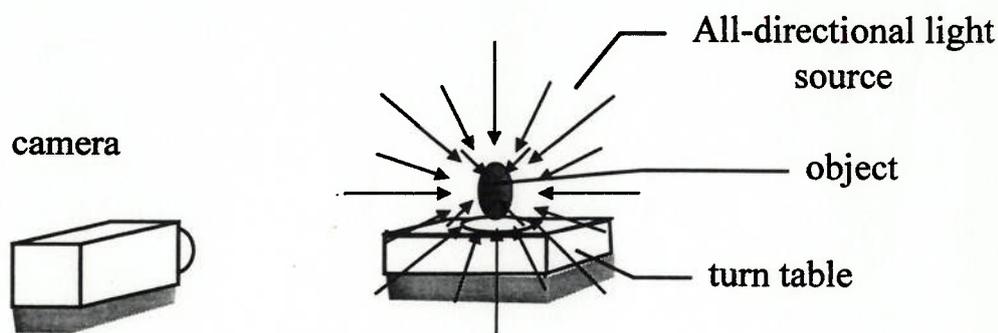
- A identificação de curvas senoidais pode ser feita somente pelo processo de detecção de arestas.
- A identificação de curvas senoidais pode ser feita sem suposição de reflectância difusa perfeita.
- Com suposição de superfície que proporciona difusão perfeita e o uso de fonte de luz circular permite calcular a orientação do vetor normal e o fator de reflectância.

**Desvantagens:**

- A identificação de curvas senoidais só é possível para pontos peculiares.

### 2.2.2 Método 2: Recuperação de objeto com forma densa em rotação por escolha ponderada<sup>[8]</sup>

Neste outro método, um objeto também é colocado numa mesa giratória e rotacionado a uma velocidade constante assim como no método anterior. O objeto com superfície de difusão perfeita, é iluminado por uma fonte de luz omnidirecional de forma que o objeto reflete igual intensidade de luz independentemente da sua localização e posição (Fig.2.13).

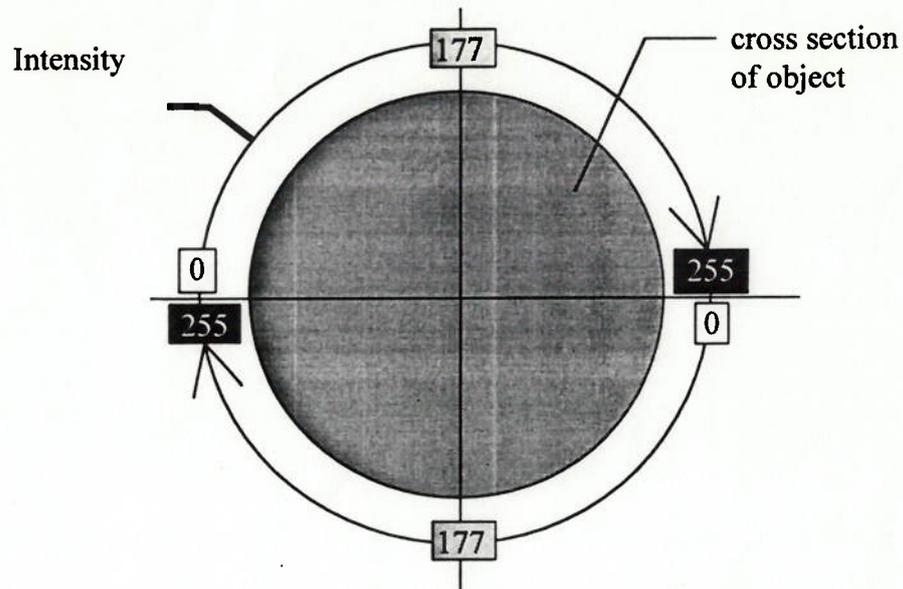


**Fig.2.13:Arranjo experimental para o Método 2**

Nestas condições, durante a rotação, qualquer ponto observado na superfície do objeto mantém uma mesma intensidade. Portanto, um ponto apresenta uma intensidade constante ao longo da trajetória (uma curva senoidal) na EPI. A recuperação da forma é atingida encontrando as trajetórias utilizando esta característica e analisando-as.

Uma simulação foi realizada com um cilindro com vários fatores de reflectância em cada ponto da superfície. Foi suposto que este cilindro reflete luz de intensidade 0 a 255 em meio círculo gradualmente (Fig.2.14). A EPI simulada deste cilindro é mostrada na Fig.2.15(a).

Nesta EPI, um ponto  $P_0$  apresenta uma mesma intensidade ao longo de sua trajetória. Assim, seguindo a mesma intensidade obtém-se trajetória de um ponto.

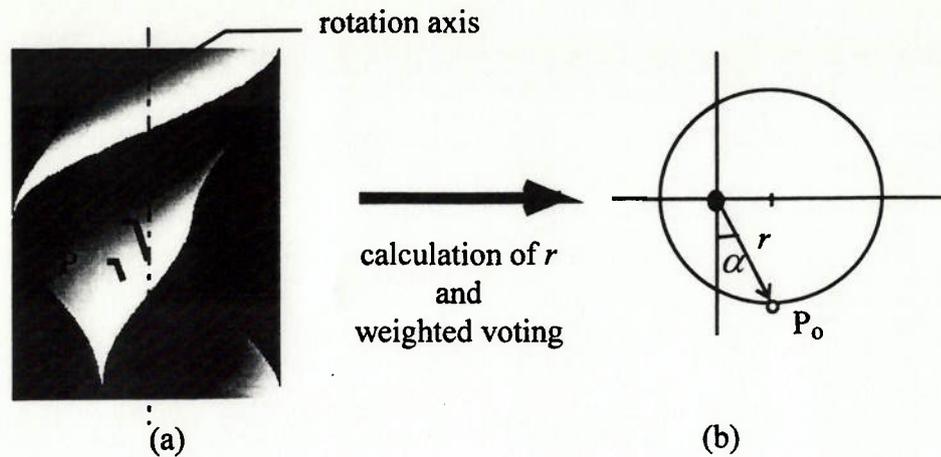


**Fig.2.14:Cilindro com a reflectância que varia gradualmente**

Na realidade, devido a ruídos, uma trajetória de um ponto não apresenta uma mesma intensidade durante toda a trajetória na EPI e por esta razão, a identificação da trajetória é feita através do seguinte método de escolha ponderada.

Para um ponto  $P_0$ , acha-se todos os pontos  $P$  de intensidade similar. Para cada  $P$  encontrado, calcula-se a amplitude de uma curva senoidal que passa por  $P_0$  e  $P$ . Atribui-se então, um peso de escolha ao  $r$  encontrado, de acordo com a diferença de intensidade de  $P_0$  e  $P$ . O  $r$  que receber o maior peso é por fim selecionado como sendo a amplitude da curva senoidal correspondente a  $P_0$ .

Em seguida, o ponto é recuperado nas coordenadas polares como mostrado na Fig.2.15(b).



**Fig.2.15: A EPI simulada e o resultado recuperado**

Processo análogo é repetido para cobrir todos os pontos ao longo do eixo de rotação na EPI para recuperar a forma do objeto.

Resumo de características deste método.

**Suposições:**

- Superfície que proporciona difusão perfeita.
- Uso de fonte de luz omnidirecional.
- Fator de reflectância diferente em cada ponto da superfície.

**Vantagens:**

- Recuperação estável contra ruído e mudanças de intensidade pode ser feita pelo uso de escolha ponderada.
- A busca da curva senoidal pode ser substituída pela busca de pontos de intensidade constante.

**Desvantagens:**

- Cada ponto deve ter reflectancia diferente.
- Não permite o cálculo do vetor normal em cada ponto.

## 2.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, foi explicado o princípio do método de recuperação da forma de objetos por meio de rotação, um método simples que requer o uso de uma única câmera e uma fonte de luz. Sucessivas imagens são obtidas do objeto em rotação a uma velocidade constante. A partir das imagens obtêm-se as EPIs (Epipolar Plane Image). Identificando-se a trajetória que cada ponto descreve em cada EPI, recupera-se a posição do ponto na superfície do objeto. E repetindo-se o processo, chega-se à forma do objeto.

Foram ainda apresentados e discutidos dois métodos que se baseiam no princípio acima descrito. No primeiro método, assume-se a existência de pontos peculiares no objeto, de tal sorte que a trajetória dos pontos pode ser facilmente identificada na EPI. Apesar de simples, o método não é eficaz no caso de objetos com formas suaves ou com reflectância uniforme. Já o segundo método propõe que o objeto seja iluminado de tal forma que qualquer ponto do objeto apresenta uma intensidade constante ao longo de toda a trajetória na EPI. Este método, apesar de possibilitar a recuperação de forma de objetos com reflectância não-uniforme, deixa de ser eficaz quando a reflectância é uniforme.

### 3. Método de dois pontos simétricos

Neste capítulo, o autor propõe um novo método, denominado de Método dos 2 Pontos Simétricos, que diferentemente dos métodos convencionais, que foram apresentados no capítulo anterior, torna possível recuperar a forma do objeto sem as restrições feitas por outros métodos, tais como a existência de pontos peculiares ou a variação do fator de reflectância em cada ponto.

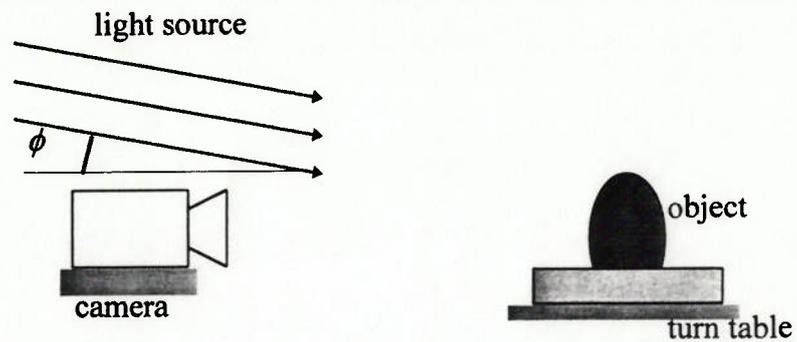
#### 3.1 Hipóteses

Assim como nos outros, este método adota a hipótese de reflexão perfeitamente difusa na superfície do objeto. Supõe-se que a iluminação é feita através de luz com raios paralelos segundo a mesma direção longitudinal da câmera, conforme mostra a Fig.3.1, e sob um ângulo vertical  $\phi$  conforme a Fig.3.2.

O objeto é colocado sobre uma mesa e rotacionada a uma velocidade  $\omega$  constante (Fig.3.1). Para efeito de explicação, assumimos uma rotação da mesa no sentido horário.



**Fig.3.1: Vista superior do sistema**



**Fig.3.2: Vista lateral do sistema**

O arranjo de ângulos é mostrado na fig.3.3.

$\theta$  : a componente angular horizontal do vetor normal

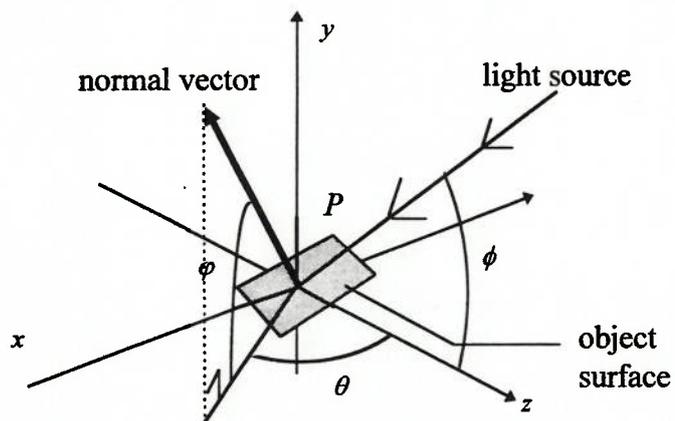
$\varphi$  : a componente angular vertical do vetor normal

$\phi$  : a componente angular vertical do vetor de fonte de luz paralela

$\xi$  : fator de reflectância

$\omega$  : velocidade de rotação

$\Delta t$  : intervalo de tempo



**Fig.3.3: Arranjo dos ângulos**

## 3.2 O método

Tal qual nos outros métodos mencionados no capítulo anterior, a recuperação total da forma é feita obtendo-se EPIs em diferentes alturas, a partir das sucessivas imagens obtidas do objeto em rotação, identificando-se curvas senoidais da trajetória descrita pelos pontos e reconstruindo-se seções transversais em cada altura. Contudo no caso deste novo método, a identificação das curvas senoidais não requer a existência de pontos especiais (tais como pontos peculiares e variação do fator de reflectância). A curva senoidal é identificada a partir da variação da intensidade que ocorre em cada ponto devido à rotação do objeto.

### Identificação da curva senoidal pela mudança de intensidade

Na Fig.3.4,  $x_0$  representa o eixo de rotação. Considere-se a trajetória do ponto  $P_c$ , que está localizado em  $x_0$  no instante  $t_0$  (este ponto é chamado de  $P_0$ ).

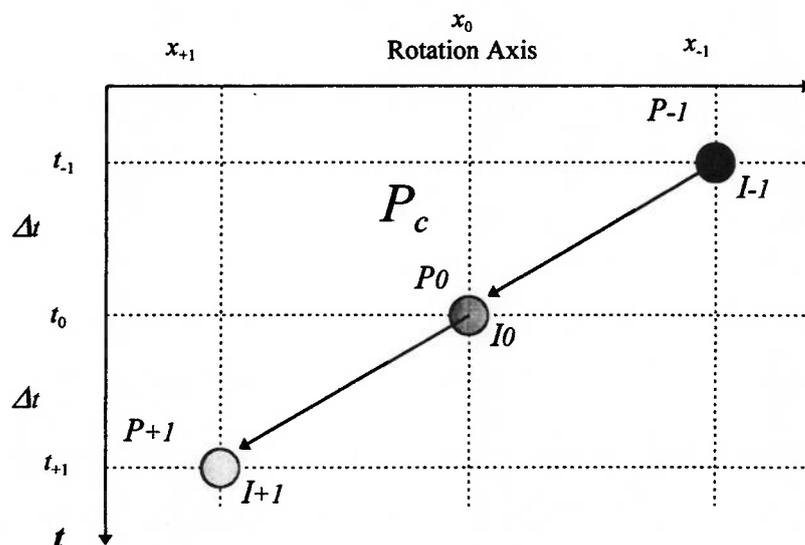


Fig.3.4: Trajetória do ponto  $P_c$  na EPI

Conforme o objeto gira em torno de  $x_0$  com velocidade  $\omega$  constante,  $P_c$  descreve uma trajetória senoidal sobre a EPI correspondente. Como a direção de rotação é horária, durante o período visível de rotação e antes de  $t_0$  todos os pontos estarão localizados no

semiplano superior-direito da EPI, e após  $t_0$  todos os pontos estão localizados no semiplano inferior-esquerdo.

Os pontos na trajetória antes e após  $t_0$ , de um intervalo de tempo  $\Delta t$  são chamados de  $P_{-1}$ ,  $P_{+1}$  respectivamente. Esses dois pontos devem estar localizados em posições simétricas em relação a  $P_0$ .

Chamando as intensidades em  $P_0$ ,  $P_{-1}$  e  $P_{+1}$  de  $I_0$ ,  $I_{-1}$  e  $I_{+1}$  respectivamente, essas intensidades podem ser descritas como segue.

$$\begin{cases} I_0 = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos \theta = A \cos \theta \dots\dots (5.1) \\ I_{-1} = A \cos(\theta - \omega \cdot \Delta t) \dots\dots\dots (5.2) \\ I_{+1} = A \cos(\theta + \omega \cdot \Delta t) \dots\dots\dots (5.3) \end{cases}$$

onde  $A = \xi \cos(\varphi - \phi) = \text{constante}$ .

Usando as Eq.(5.1), Eq.(5.2) e (5.3) obtém-se:

$$\begin{cases} I_{-1} = I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t) + A \sin \theta \sin(\omega \cdot \Delta t) \dots\dots (6.1) \\ I_{+1} = I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t) - A \sin \theta \sin(\omega \cdot \Delta t) \dots\dots (6.2) \end{cases}$$

Os primeiros termos à direita nas Eq.( 6.1) e (6.2) são conhecidos.

Como  $A$  e  $\theta$  são parâmetros desconhecidos, os segundos termos à direita nas Eq.(6.1) e (6.2) são desconhecidos. A diferença de sinal (+ ou -) do segundo termo caracteriza as intensidades de 2 pontos simétricos.

Estes termos desconhecidos das equações são substituídos por  $D_{-1}$ ,  $D_{+1}$ . Então,

$$\begin{cases} D_{-1} = A \sin \theta \sin(\omega \cdot \Delta t) = I_{-1} - I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t) \dots\dots\dots (7.1) \\ D_{+1} = A \sin \theta \sin(\omega \cdot \Delta t) = -I_{+1} + I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t) \dots\dots\dots (7.2) \end{cases}$$

A partir das Eq.(7.1) e (7.2), para cada  $P_{-j}$  obtém-se  $D_{-j}$  e para cada  $P_{+j}$ , obtém-se  $D_{+j}$ . Como  $D_{-j}$  e  $D_{+j}$  devem ter o mesmo valor ( $A \sin \theta \sin(\omega \Delta t)$ ), aplica-se a Eq.(7) para todos os pares de pontos a fim de se encontrar pares de pontos com mesmo valor de  $D$ . As condições (completas) para se encontrar 2 pontos são:

As Condições:

- $x_{+j} < x_0 < x_{-j}$
- $t(p_{-j}) < t(p_0) < t(p_{+j})$
- $|x_{+j} - x_0| = |x_0 - x_{-j}|$
- $D_{-j} = D_{+j}$

A primeira e segunda condição correspondem ao fato de que um ponto move do ponto superior direito para o inferior esquerdo por causa da direção de rotação horária. A terceira e a quarta condição significam que os dois pontos devem estar em posições simétricas com relação a  $P_0$ . A quinta condição é para satisfazer a mudança de intensidade.

Na práticas, as intensidades  $I_{-j}$  e  $I_{+j}$  não podem satisfazer rigorosamente a quinta condição por causa de ruído, etc. Portanto, para escolher o par de ponto, será utilizada a seguinte função;

$$f(P_{-j}, P_{+j}) = |D_{-j} - D_{+j}| \dots \dots \dots (8)$$

Um par de pontos  $P_{-j}$  e  $P_{+j}$  é escolhido de modo a minimizar esta função  $f$ .

Uma vez que os dois pontos estão na mesma curva senoidal, a amplitude e a fase da curva ( $r, \alpha$ ) podem ser expressas como:

$$\alpha = \omega \cdot t_{(p_0)}$$

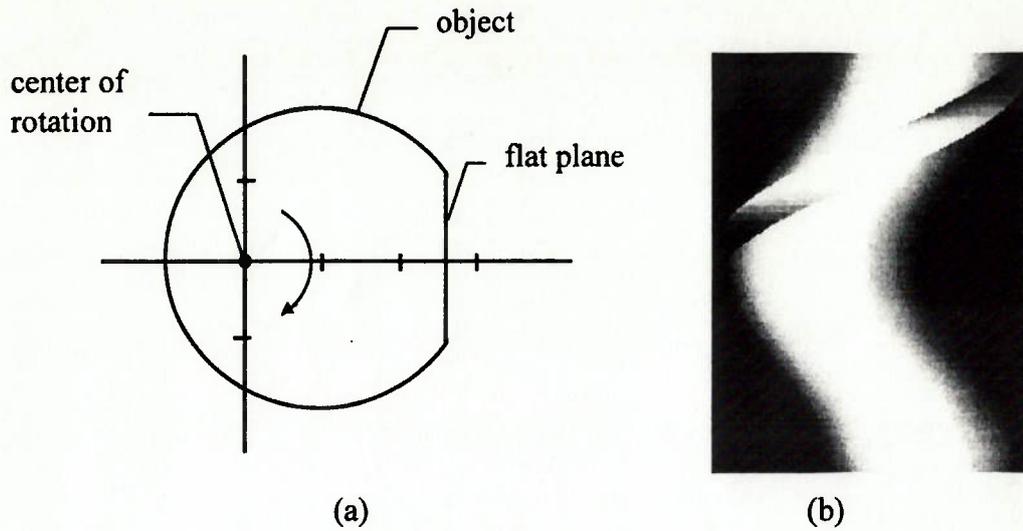
$$r = \frac{x_{(p_{-1})} - x_{(p_0)}}{\sin \omega(t_{(p_{-1})} - t_{(p_0)})} \dots\dots\dots(9)$$

Desenhando os pontos em coordenadas polares obtém-se uma imagem da seção transversal do objeto.

### 3.3 A Unicidade da Solução

Um par de pontos que satisfaz as condições não é necessariamente o único quando o objeto possui um parte plana em sua superfície. A Fig.3.5(a) mostra um exemplo de um objeto cilíndrico com uma parte plana. Foi simulado uma EPI para este objeto e o resultado apresentado na Fig.3.5(b). A parte da figura que se assemelha a uma faixa constitui a trajetória da parte plana do objeto. Observe-se que a parte apresenta uma mesma intensidade horizontalmente e portanto nestes locais a solução não é única.

Contudo, a detecção de uma superfície plana numa EPI é relativamente simples. Bastaria, detectar a existência de alguma região que apresente pontos adjacentes na direção horizontal, que apresentem uma mesma intensidade. Caso se constate a existência desta, concluir-se-á que existe uma parte plana no objeto, e será então aplicado um tratamento específico para recuperar esta parte. A técnica do vetor normal da superfície, que será apresentado a seguir, é um tratamento adequado para esta recuperação.



**Fig.3.5: Simulação de EPI de um cilindro com face plana**

### 3.4 Recuperação da forma pelo cálculo do vetor normal da superfície

A componente horizontal do vetor normal ( $\theta$ ) em um ponto da superfície podem ser calculados ainda que o fator  $A$  da Eq.(5) não seja conhecido.

Das Eq.(6), o termo  $A$  pode ser eliminado dividindo uma equação pela outra.

$$\begin{cases} A \sin \theta = \frac{I_{-1} - I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t)}{\sin(\omega \cdot \Delta t)} \\ A \cos \theta = I_0 \end{cases}$$

$$\tan \theta = \frac{A \sin \theta}{A \cos \theta} = \frac{I_{-1} - I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t)}{I_0 \sin(\omega \cdot \Delta t)}$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1} \left( \frac{I_{-1} - I_0 \cos(\omega \cdot \Delta t)}{I_0 \sin(\omega \cdot \Delta t)} \right) \dots\dots\dots(10)$$

Aqui, o valor de  $\theta$  pode ser calculado atribuindo valores para  $I_0$  e  $I_1$ . Esta informação sobre o vetor normal pode ser usado diretamente para recuperar a forma.

Utilizando-se a Eq. (10), obtemos a seguinte equação para a recuperação de um raio a partir do raio no intervalo anterior de ângulo de rotação.

$$r_{i+1} = r_i + r_i \Delta\alpha \tan \theta \dots\dots\dots(11)$$

onde:

$\Delta\alpha$  é o intervalo de ângulo de rotação;

$\theta$  é o ângulo do vetor normal.

Recuperando uma forma com plano como o método de identificação de curva senoidal que exposto anteriormente, não pode ser utilizado, esse método pode recuperar a forma neste jeito.

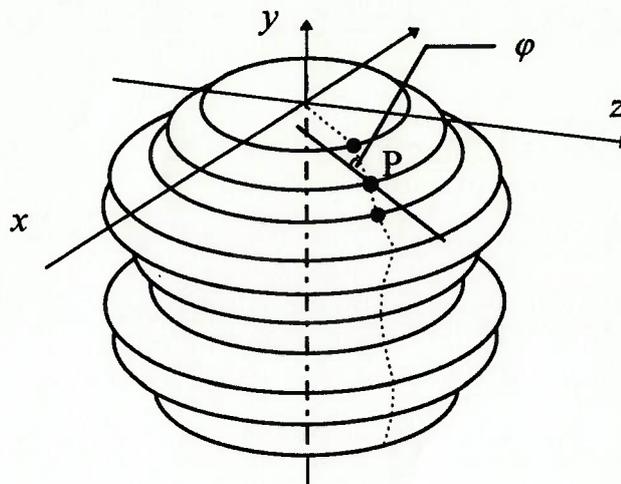
Também pode ser utilizado para verificar os parâmetros  $(r, \alpha)$  obtidos pelo método de identificação da curva senoidal.

### 3.5 Cálculo do fator de reflectância

A Eq (5.1) resulta em:

$$\xi = \frac{I_0}{\cos(\varphi - \phi) \cdot \cos\theta} \dots\dots\dots(12)$$

O  $\theta$  pode ser calculado conforme indicado no item anterior. O  $I_0$  pode ser obtido pela EPI. E a componente vertical angular do vetor normal  $\phi$  pode ser obtido a partir da informação de imagens de seções transversais vizinhas em diferentes alturas (Fig.3.6).



**Fig.3.6 :Componente vertical angular do vetor normal  $\varphi$**

Construindo a forma usando fatores de reflectancia de cada pontos, textura e padrões podem recuperados também. Utiliza um câmera colorida ainda permite recuperar uma forma colorida.

### 3.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi proposta o método de dois pontos simétricos para a identificação da trajetória de um ponto na EPI, e conseqüentemente, para a recuperação da forma de um objeto. O método proposto, assume a hipótese de utilização de fonte de luz paralela e difusão perfeita na superfície de objeto. Com base nestas hipóteses, busca-se para um determinado ponto da EPI, pontos vizinhos e simétricos que apresentem variação de intensidade conforme previsto através de um modelo matemático. Identificados tais pontos, determina-se a trajetória do ponto em questão e por conseguinte, a sua posição na superfície do objeto. Repete-se o processo para outros pontos, até recuperar a forma da seção transversal. Recuperando-se diversas seções a diferentes alturas, recupera-se a forma tridimensional do objeto. Alternativamente, esse método permite ainda recuperar a forma do objeto através do cálculo do vetor normal dos pontos na superfície, permitindo com isso, recuperar a forma de objetos com trechos planos. Diferente dos métodos já propostos por outros autores para este mesmo fim, o presente método não

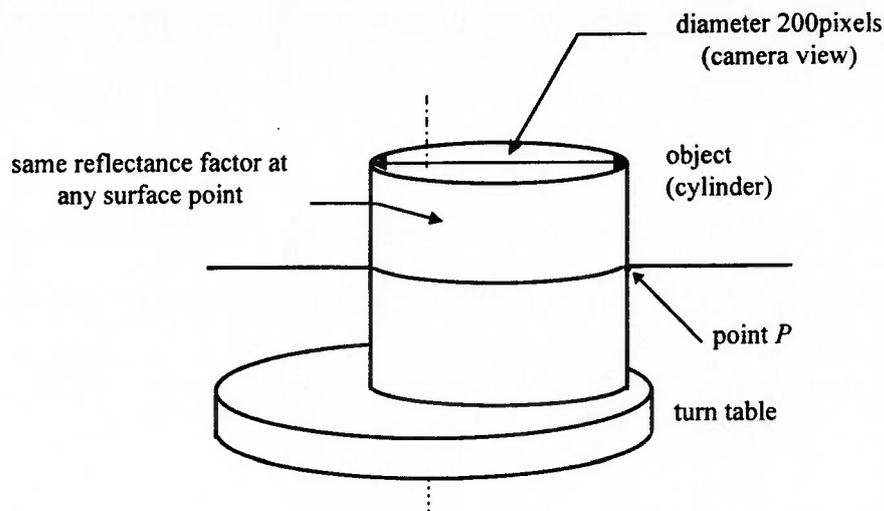
requer iluminação especial (fonte anular de iluminação, por exemplo) e além disso, não requer a existência de descontinuidades de intensidade na imagem do objeto (marcas, arestas, etc.), ampliando com isso o universo de objetos a serem tratados.

## 4. Avaliação do Método

Neste capítulo será feita a avaliação do método proposto em termos de eficácia. A avaliação será feita primeiro através de simulação computacional, através da qual se busca as condições ideais para uma recuperação precisa da forma. Estuda-se ainda nesta parte, o comportamento do método em variadas situações: objeto em diferentes posições com relação ao eixo de rotação, objeto apresentando diferentes fatores de reflectância em sua superfície e objeto com trecho plano. Na segunda parte deste capítulo, passa-se então à avaliação do método através de experimentos, com a utilização de objetos, iluminação, imagens em condições reais.

### 4.1 Avaliação do método através de EPI simulada

Foi realizada uma simulação do método proposto utilizando-se um objeto cilíndrico. A Fig.4.1 mostra a configuração da simulação. O eixo de rotação não coincide com o eixo do cilindro. Assume-se que o diâmetro do cilindro seja de 200 pixels na coordenada  $x_c$  (visão da câmera) e que o fator de reflectância é o mesmo em qualquer lugar da superfície. Consideremos o ponto  $P$  no lado direito do cilindro da fig.4.1. Nestas condições, simular se a recuperação da forma da seção do objeto à altura do ponto  $P$ .



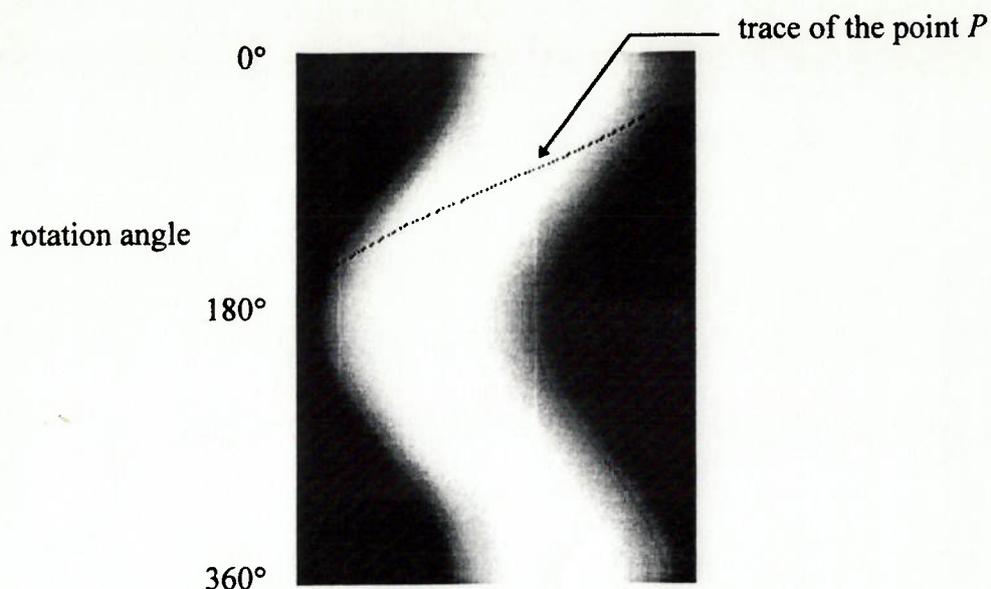
**Fig.4.1: Configuração para a simulação de EPI**

#### **4.1.1 Simulação de EPI**

Como foi assumida uma velocidade constante de rotação da mesa e do objeto, a escala de tempo das EPI que aparecerão daqui para frente, foi substituída por uma escala de ângulo de rotação (multiplicando escala de tempo por  $\omega$ ). As EPIs foram produzidas supondo 8 bits de níveis de cinza.

A Fig.4.2 mostra o resultado da simulação da EPI, na qual a trajetória de um determinado ponto  $P$  do objeto foi intencionalmente destacado. Numa situação real esta trajetória não seria visível. Nota-se aqui que a sinuosidade da imagem em seu todo e a trajetória descrita pelo ponto  $P$  não coincidem, indicando que, em casos como este, tanto o método de detecção de aresta como o de busca de mesma intensidade, propostos por outros autores, não poderiam ser utilizados.

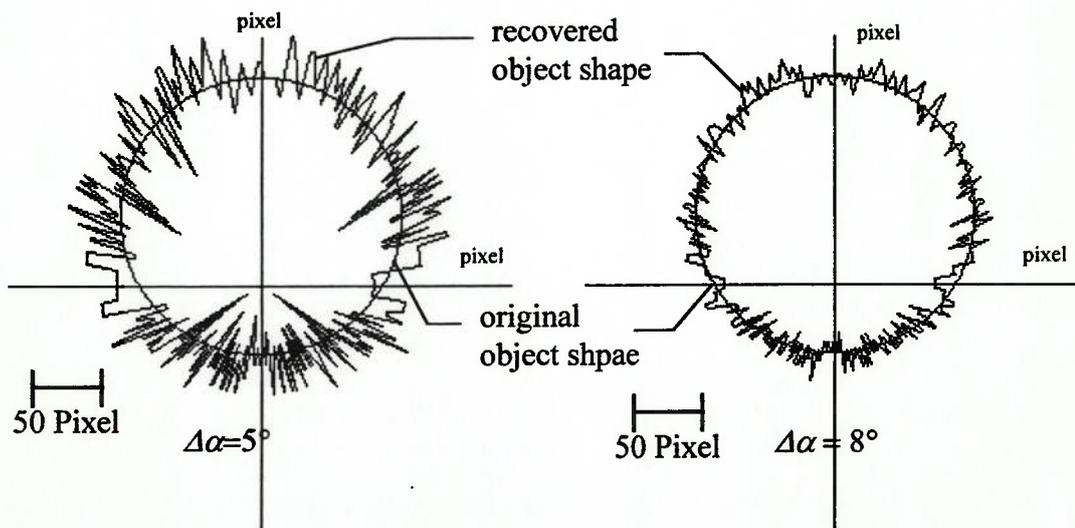
Utilizando esta EPI, foi então realizada a recuperação da forma da seção do objeto.

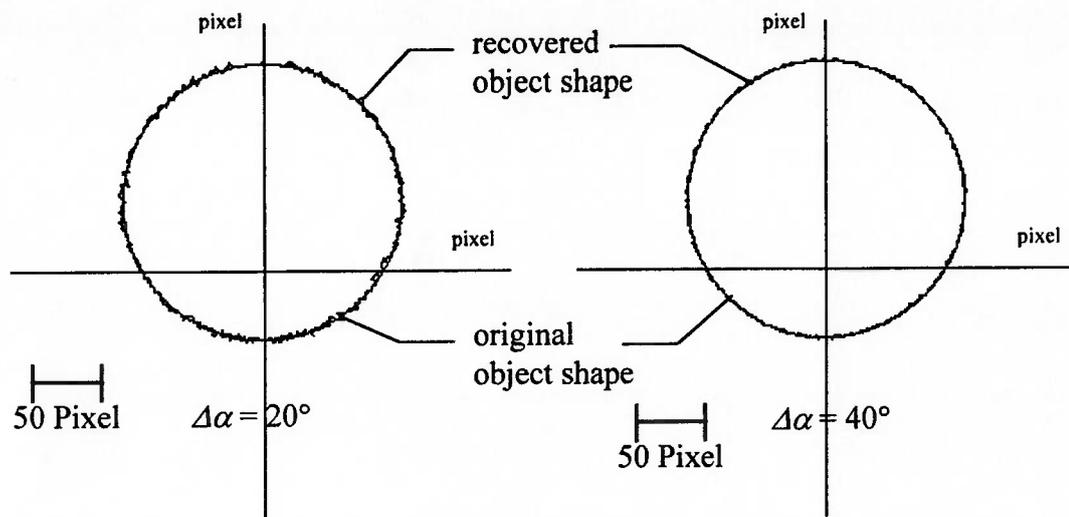


**Fig.4.2: EPI simulada de um cilindro**

#### 4.1.2 Recuperação de forma pela identificação da trajetória senoidal

A recuperação de forma foi feita com vários intervalos de tempo  $\Delta t$  ou intervalos de ângulo de rotação  $\Delta\alpha = \omega\Delta t$ . Os resultados são dados na Fig.4.3, onde o perfil real (circulo perfeito) está sobreposto ao perfil recuperado.





**Fig.4.3: Resultados da recuperação de forma a partir da identificação da trajetória senoidal**

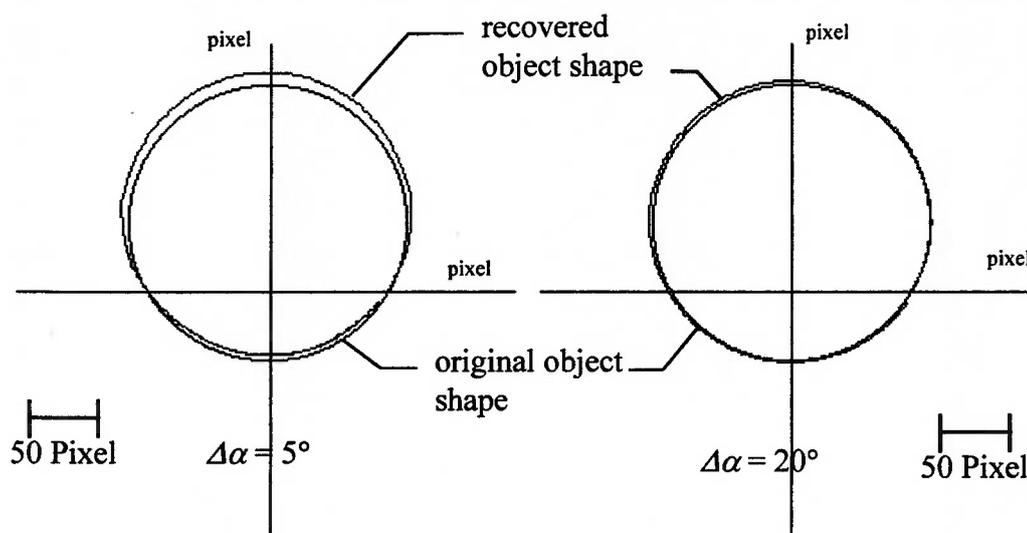
A Fig.4.3 mostra que um intervalo de ângulo de rotação maior permite a obtenção de melhores resultados na recuperação de formas. Na simulação com  $\Delta\alpha = 5^\circ$ , a diferença de intensidade com os pontos da vizinhança se torna pequena devido às pequenas alterações do ângulo de rotação, e em função disto a busca dos pares corretos se torna mais difícil. O erro na obtenção de  $x_i$  tem influência direta no cálculo de  $r$ . Como regra básica, é desejável se adotar o maior  $\Delta\alpha$  possível. O limite teórico para o  $\Delta\alpha$  é de  $90^\circ$ , mas com um intervalo de ângulo de rotação tão grande, fica difícil rastrear uma trajetória pois o ponto pode ficar escondido pelo próprio objeto durante a rotação. Seria desejável a mudança do intervalo angular para cada caso.

#### 4.1.3 Recuperação de forma através de vetor normal

Foi realizada em seguida, a recuperação de objetos através do cálculo de vetores normais utilizando a Eq.(11). Para se determinar completamente a forma, é necessário ter de antemão ao menos um valor de raio para um valor de  $\Delta\alpha$ . Isto pode ser feito pela técnica de identificação da trajetória senoidal, por medição direta através da imagem, por meio de medição prévia com escalas etc.

A Fig.4.4 mostra os resultados da recuperação. Neste caso, são obtidas formas mais suaves do que os obtidos através de identificação de trajetórias senoidais. Mesmo quando  $\Delta\alpha = 5^\circ$ , a forma recuperada por esta técnica é mais precisa comparado à forma obtida através do método de identificação. Conforme pode ser observado pela Eq.(11), o erro na recuperação se propaga e se acumula.

A Eq.(11) indica que a mudança de raio, ou seja a resolução da recuperação, é determinada por  $r_i \Delta\alpha \tan\theta$ . Portanto, quanto menor o valor de  $\Delta\alpha$  melhor será a resolução da recuperação. Por conseguinte, no caso pratico, há um limite de mudança de raio.



**Fig.4.4: Resultados da recuperação de formas através de vetores normais**

No caso desta simulação, melhores resultados podem ser obtidos usando  $\Delta\alpha$  maior. A EPI foi obtida matematicamente através de computador e a EPI apresenta intensidades discretas. Assim sendo, um valor menor de  $\Delta\alpha$ , faz com que o resultado se afaste do forma certa.

#### 4.1.4 Simulação sob condições variadas

Quatro situações foram supostas para testar este método sob condição mais complexas.

As quatro condições são:

- (a) cilindro com eixo de rotação, a uma distância  $R$  (próprio raio) do seu centro
- (b) cilindro com eixo de rotação, a uma distância  $2R$  do seu centro
- (c) cilindro com diferentes fatores de reflectância em cada metade
- (d) cilindro com uma parte cortada verticalmente

Os objetos são mostrados na Fig.4.5.

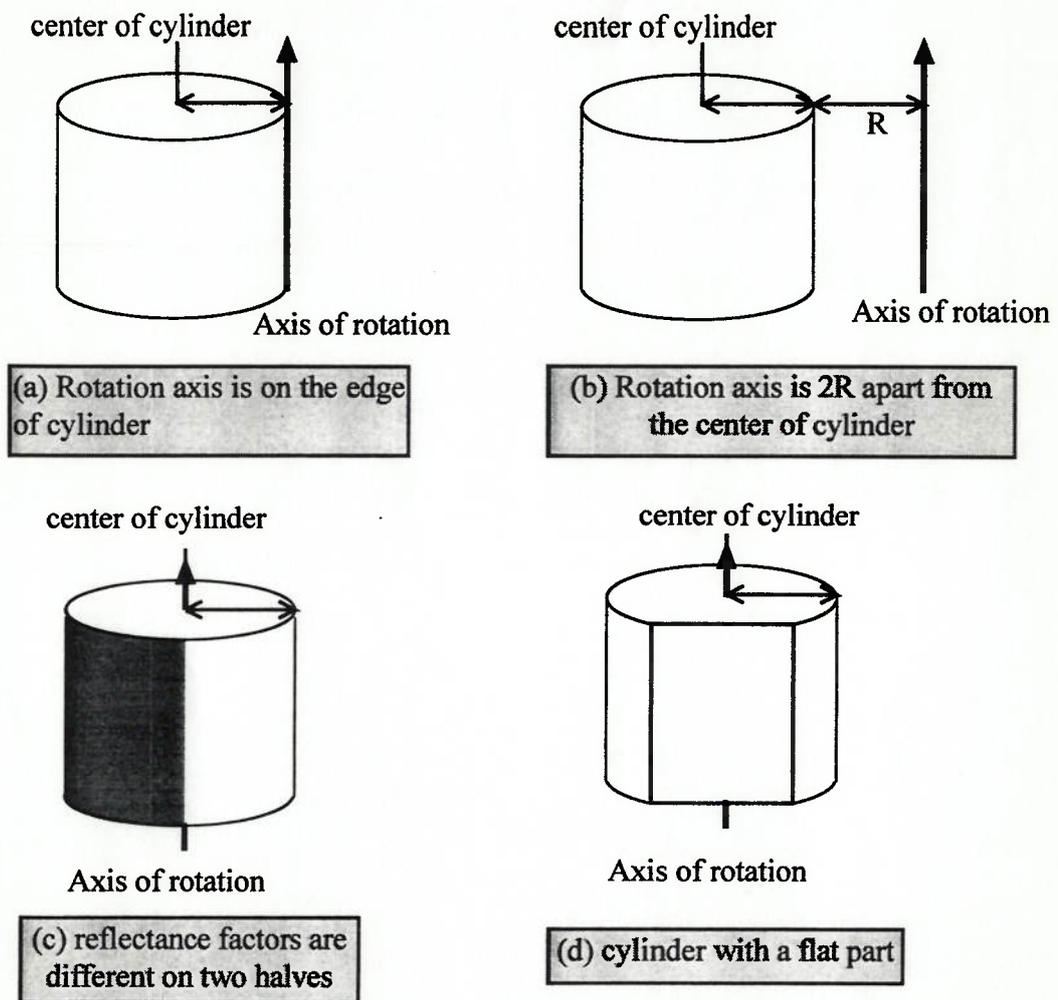
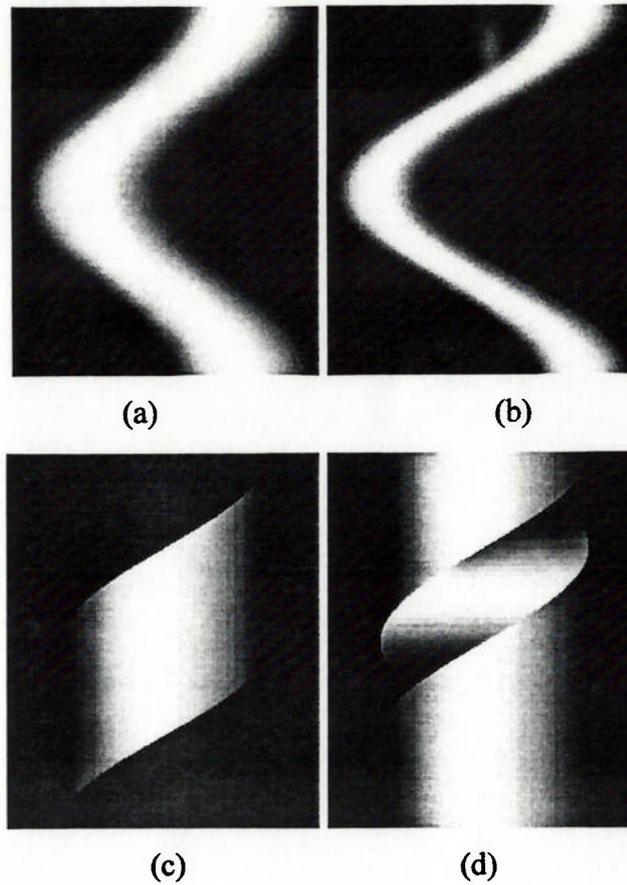


Fig.4.5 : Condições variadas para simulação

#### 4.1.4.1 Simulação das EPIs

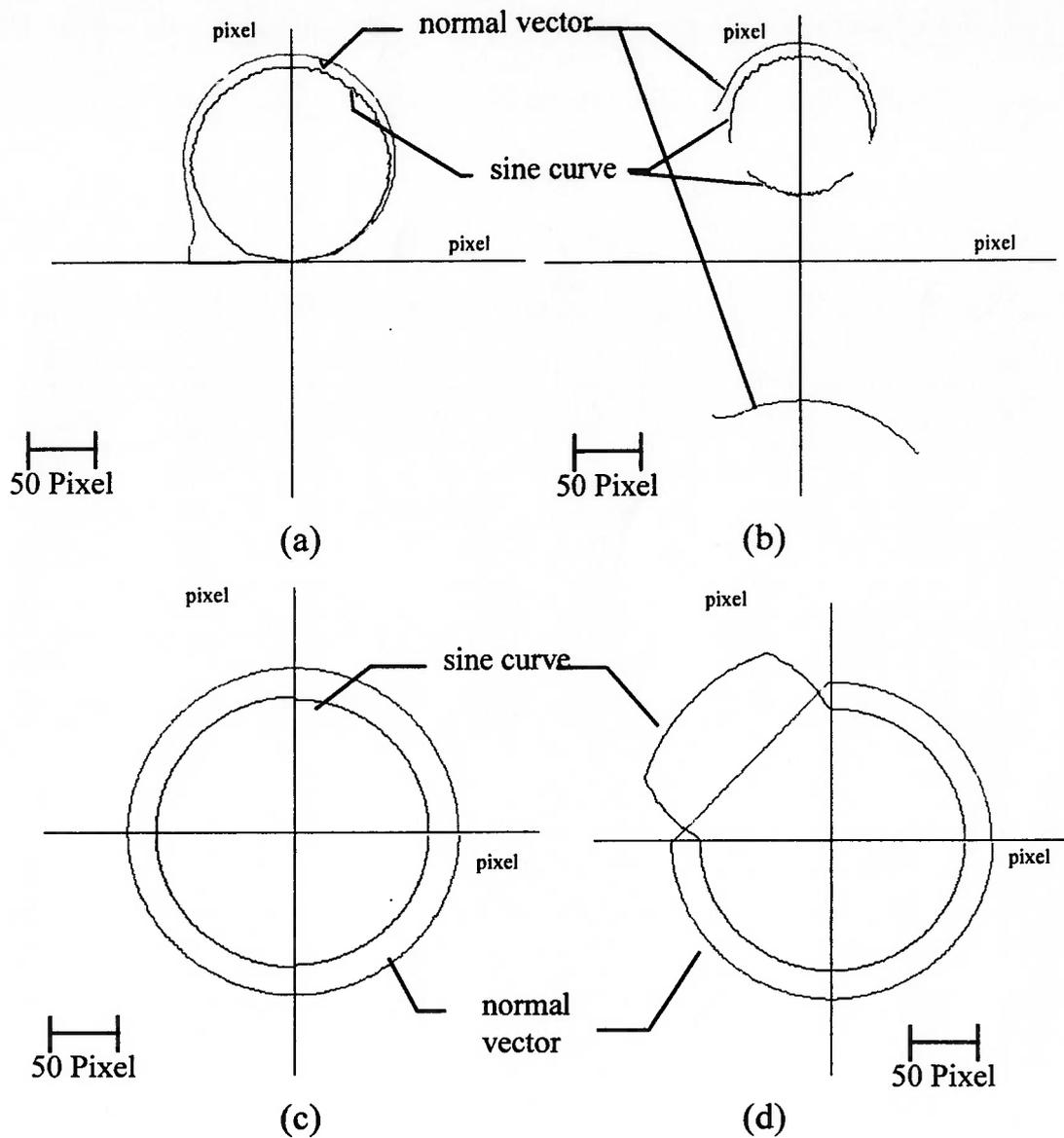
As EPIs dos casos (a) ~ (d) da fig.4.5 foram criadas na Fig.4.6.



**Fig.4.6 : EPIs dos quatro casos**

#### **4.1.4.2 Resultados da recuperação de forma**

A recuperação das formas foram feitas usando  $\Delta\alpha = 30^\circ$ . A Fig.4.7, mostra a forma recuperada pela identificação de trajetória senoidal e a forma recuperada através dos vetores normais.



**Fig.4.7: Resultados da recuperação de forma**

O método de identificação das curvas senoidais, permite uma boa recuperação da forma dos objetos, a menos de (d), caso em que o objeto apresenta uma parte plana. Nos casos (a) e (b), a técnica do vetor normal não permite recuperar a forma de maneira satisfatória pois para tanto seria preciso usar um  $\Delta\alpha$  maior, perto de  $90^\circ$ . Porém quanto aos casos (c) e (d), este método permite uma boa recuperação, especialmente na parte plana de (d).

Em (a), a forma recuperada através dos vetores normais ficou deslocada, devido ao acúmulo dos erros e no final, o valor da tangente do vetor normal se aproxima do infinito, tornando impossível o processamento.

Também em (b) há uma parte onde a tangente do vetor normal se aproxima a infinito, e a forma recuperada ficou deslocada. A forma recuperada através do método de identificação da trajetória senoidal apresenta duas descontinuidades. Isto ocorreu porque nestas partes, o vetor normal chegou a um valor próximo a  $90^\circ$ . Com isso tais regiões apresentaram intensidade próxima a zero, durante a análise na EPI (a busca é sempre iniciada pelo ponto sobre o eixo de rotação), confundindo-se com o fundo.

Ainda no caso (b), ao se utilizar a identificação da trajetória senoidal, quando o ângulo de rotação ultrapassa  $180^\circ$ , o movimento de um ponto visível passa a ser dar no sentido contrário e o sinal do raio calculado passa a ser negativo (-). O método faz este processamento automaticamente mas o método de vetor normal não permite a inversão do raio calculado.

Em (c) e (d), os raios iniciais das formas de vetor normal foram propositalmente aumentadas para facilitar a distinguir as formas obtidas pelas duas técnicas.

Em (c) obteve-se uma recuperação satisfatória pelas duas técnicas. No caso da identificação da trajetória senoidal, os raios recuperados da parte de cor de cinza (metade de direita) ficaram menores do que os da parte de cor de branca (metade de esquerda). Isto ocorreu porque o número de níveis de cinza (144 nível) é menor do que o número de nível de branco (239 níveis). A mudança de intensidade fica mais descrito.

Em (d) no método de curva senoidal, quando procurar um pare ótimo, dependendo do algoritmo do programa, escolheu um  $r$  maior dos outros candidatos.

## **4.2 Avaliação do Método Através de EPI obtidos Experimentalmente**

### **4.2.1 Componentes utilizados no arranjo experimental**

Os componentes utilizados nos experimentos foram os seguintes:

- Micro computador PC (Pentium 133MHz 16Mb RAM)
- Capture Board : Fly Video (Life View, Animation Technologies Inc.)  
requer VGA com DirectDraw driver que requer um bus do tipo PCI com cores de 15 bit ou mais (captura contínua de arquivos tipo AVI a uma taxa de até 30 fps)
- Mesa giratória acionado por motor de passo  
Resolução de giro de  $0.18 \pm 0.009$  graus  
Precisão de giro na direção radial (*run-out*) de  $\pm 0.15$ mm.
- Câmera CCD: marca SONY, modelo SPT-M104A, preto e branco  
Número de elementos: 510 x 492 pixels
- Luminária de mesa (100w, lâmpada de filamento incandescente)

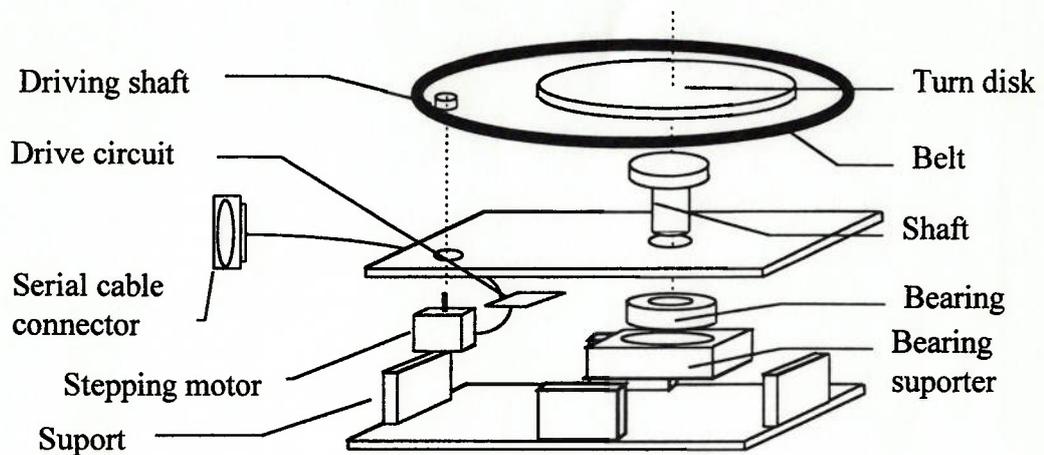
O PC controla o ângulo e a velocidade de rotação da mesa, enviando pulsos através de porta serial, ao circuito de acionamento do motor de passo. O PC também coleta a imagem captada pela câmera CCD, a cada intervalo constante de ângulo de rotação através da placa de imagem.

A mesa foi projetada para completar uma volta mediante 2000 pulsos.

A foto da mesa é mostrada na Fig.4.8.



**Fig.4.8: A foto da mesa giratória**

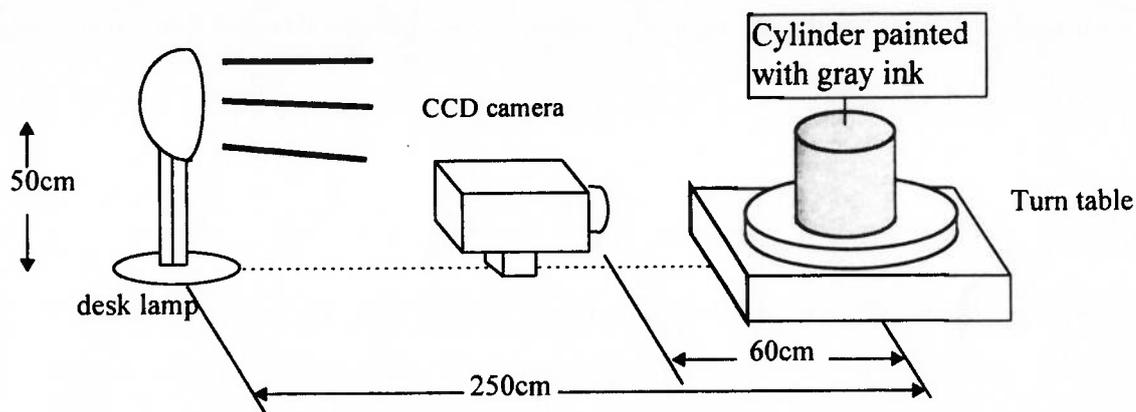


**Fig.4.9 : Estrutura da mesa**

A Fig.4.9 mostra a estrutura da mesa giratória.

## 4.2.2 Arranjo Experimental

A luminária de mesa, a câmera CCD e a mesa rotativa foram alinhados conforme a Fig.4.10.



**Fig.4.10: Arranjo experimental**

Programa de captura de imagem: VidCap (Microsoft Video for Windows)

Parâmetros de ajuste para a captura da imagem:

Image size	:	320 x 240, 24bit BMP
Brightness	:	0
Contrast	:	100
Hue	:	0
Saturation	:	0

Parâmetros de ajuste da câmera CCD:

Auto Iris	:	OFF
Focus	:	ajuste manual

### 4.2.3 Testes preliminares

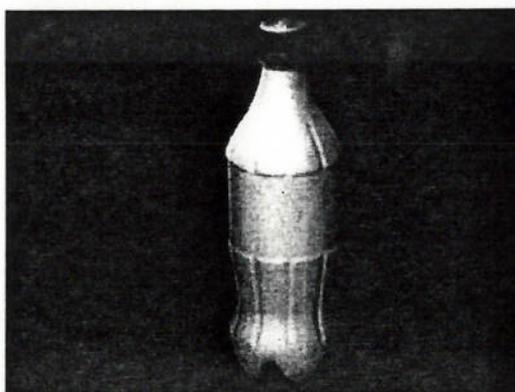
O método proposto é baseado na hipótese da iluminação por uma fonte de luz paralela e de um objeto com superfície de difusão perfeita. É esperado que em casos reais, sejam encontradas dificuldades técnicas para satisfação destas condições, e que a recuperação da forma seja afetada pelos desvios da condição ideal. Por esta razão, uma experiência simples foi realizada para estimar as dificuldades em se obter uma fonte de luz paralela e estudar o comportamento de uma superfície com respeito à sua reflectância.

#### **4.2.3.1 Luz com raios paralelos**

Como foi usada uma luminária de mesa para iluminação, foi preciso fazer uma estimativa com relação à condição de luz paralela. Usando um objeto com altura de 10 cm e largura de 30cm, e colocando a luminária a uma distancia de 250cm do objeto, o desvio angular máximo da condição de raios paralelos foi de  $2,7^\circ$  na horizontal e  $2,3^\circ$  na vertical. Em termos de intensidade (varia de 0 a 255), estes desvios correspondem a no máximo 0,5 nível de intensidade. Desta forma, foi constatado que a luminária de mesa poderia ser utilizada como fonte de luz de raios paralelos e que os efeitos resultantes do desvio da condição ideal seriam negligíveis.

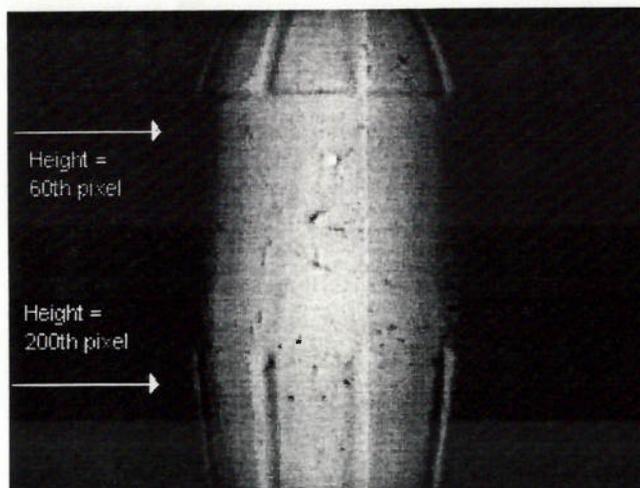
#### **4.2.3.2 Difusão perfeita**

O objeto utilizado neste experimento foi um objeto enforma de cilindro (uma garrafa plástica de Coca-Cola conforme mostra a fig.4.11) pintado com uma tinta que proporciona um acabamento fosco (tinta à base de latex para parede) e a fonte de luz foi a luminária de mesa.



**Fig.4.11: Objeto cilíndrico (garrafa de Coca-Cola)**

O arranjo experimental é descrito na Fig.4.10, a imagem do objeto foi captada pela câmera CCD e transferida ao computador. Para facilitar os processamentos, uma folha de papel preto foi colocado atrás do objeto para servir de fundo.



**Fig.4.12: Imagem obtida do objeto**

A Fig.4.12 mostra a imagem obtida. Já a fig.4.12 mostra a distribuição das intensidades dos pixels a  $\frac{1}{4}$  da altura (60 pixels) da imagem.

Supondo que a fonte seja luz paralela, que a superfície do objeto proporcione difusão perfeita e que todos os pontos pintado com a tinta tem um mesmo fator de reflectancia, a curva teórica das intensidades do cilindro pode ser calculada através da Eq.(3), que é reescrita da seguinte forma:

$$I(x) = \xi \sqrt{1 - \left( \frac{x_0 - x}{r} \right)^2} \dots\dots\dots(13)$$

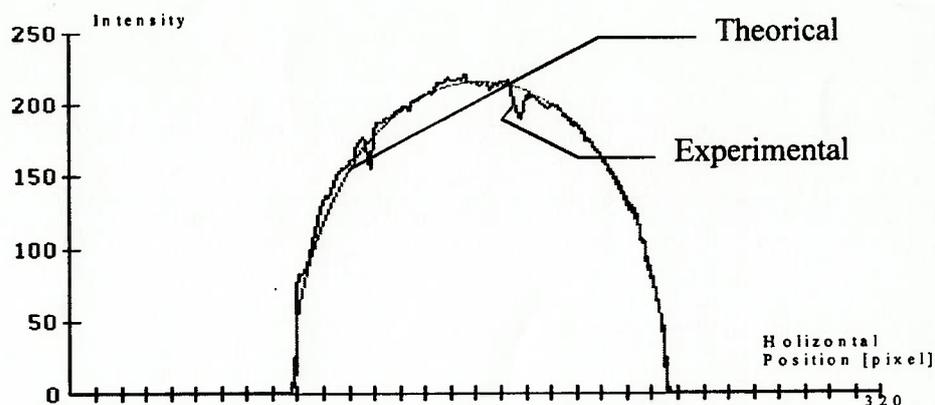
onde:

$\xi$  é fator de reflectância

$x_0$  é a posição do centro do cilindro

$r$  é o raio do cilindro

A intensidade teórica calculada desta forma e a intensidade experimental são apresentadas na Fig.4.13. Cada pixel no arquivo de imagens pode assumir 8 bits (256 níveis) de níveis de cinza.

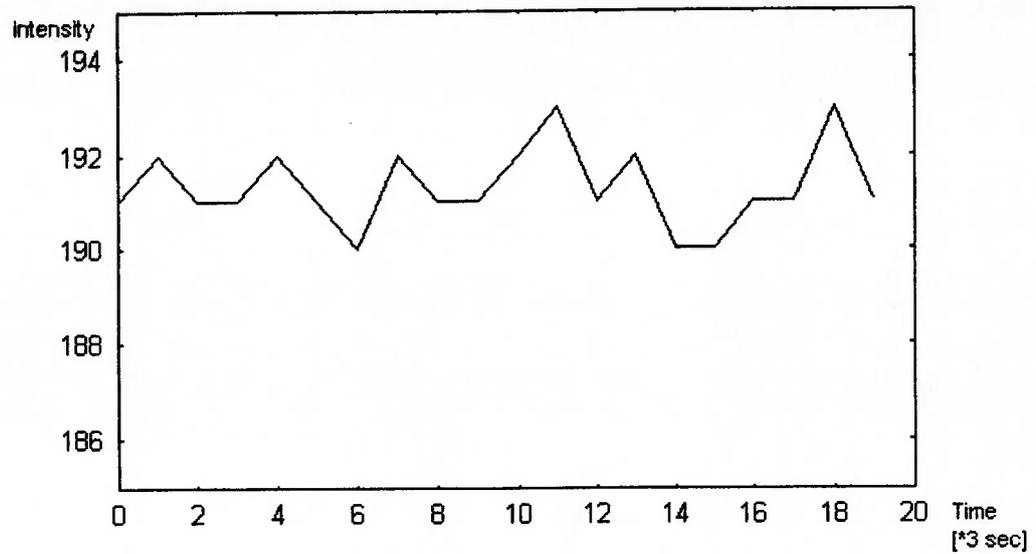


**Fig.4.13 : Curvas de intensidade refletida sob luz paralela experimental e teórica**

Na Fig.4.13, observa-se que a curva teórica e a curva experimental são similares. A curva experimental apresenta dois desvios particularmente grandes na parte superior. Isto é devido a falhas (riscos) na superfície pintada. Percebe-se ainda, a existência de ruído na curva experimental, indicando não-uniformidades no fator de reflectância da superfície.

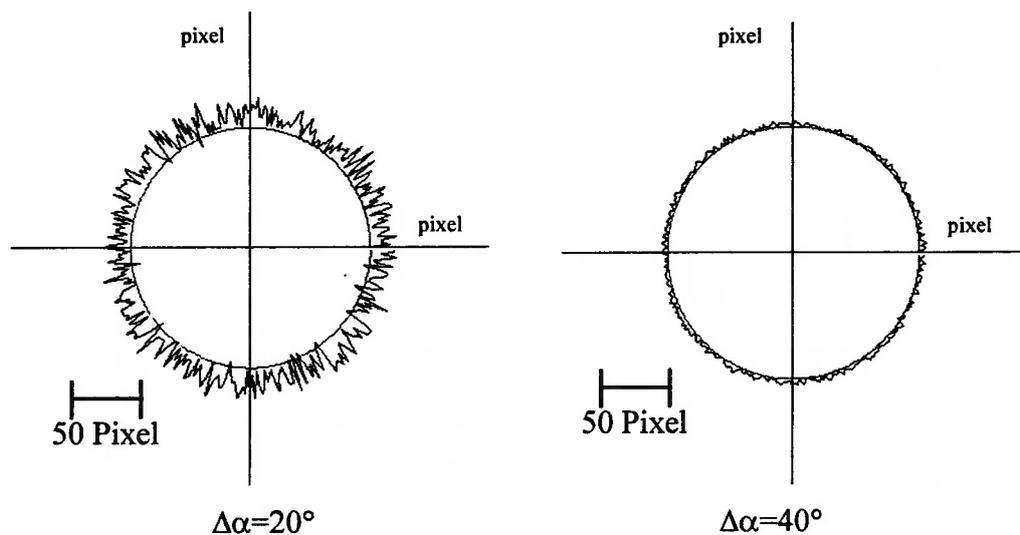
#### **4.2.3.3 Ruído de câmera**

Foram tiradas 20 imagens com o objeto (da Fig.4.12) fixo, ao longo de 1 minuto para determinar o ruído da câmera. Um ponto que tem intensidade alta na imagem foi examinado, e a mudança de intensidade deste ponto é mostrada na Fig.4.14.



**Fig.4.14: Ruído da câmera**

Desta figura pode-se constatar que o ruído da câmera é de aproximadamente 3 níveis de intensidade. Para estimar o efeito deste ruído na recuperação de forma, foi feita uma simulação considerando o ruído. O resultado é dado na Fig.4.15. Este resultado foi comparado à simulação sem o ruído (Fig.4.3).



**Fig.4.15: Formas recuperadas considerando o ruído**

Diferente dos resultados do caso da Fig.4.3, o efeito do ruído se torna grande no caso de  $\Delta\alpha = 20^\circ$ . Já com  $\Delta\alpha = 40^\circ$ , a influencia do ruído se reduz consideravelmente.

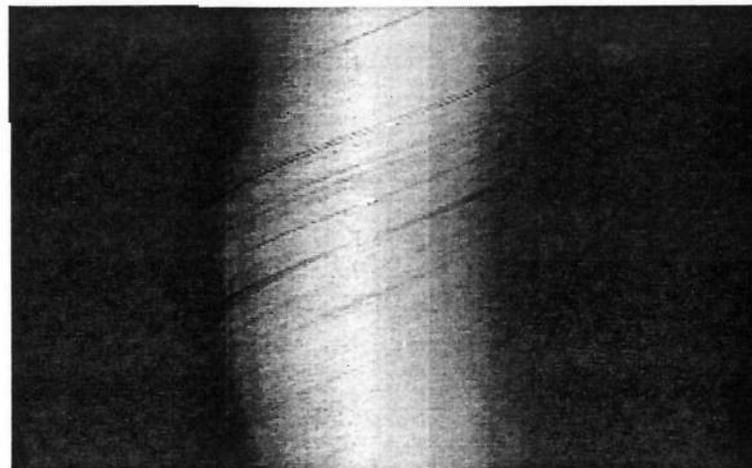
#### 4.2.4 Método experimental

Para testar o novo método, foram realizados experimentos de medição real.

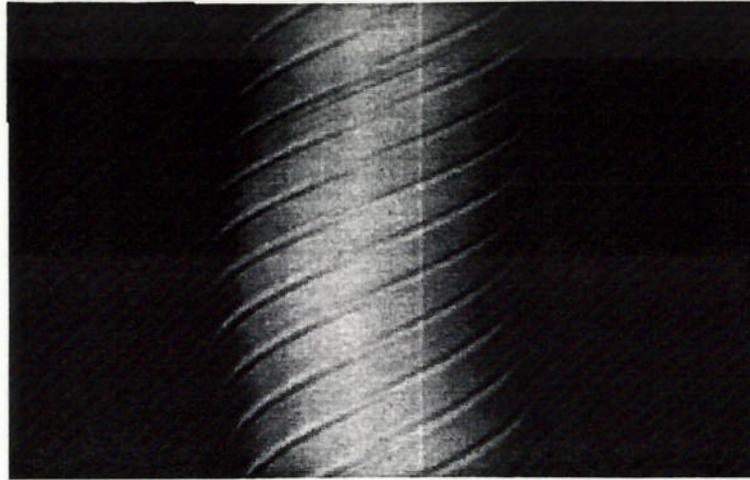
A mesa giratória consiste de: a) um disco giratório apoiado sobre mancais de rolamento, b) um motor de passo e c) o respectivo circuito de acionamento. O objeto foi o mesmo dos testes preliminares da Fig.4.12

Foram obtidas 200 imagens, uma a cada 1.8 graus de rotação. De cada imagem, foi obtida a distribuição de intensidade a uma altura de 60 pixel, e 200 pixel (Fig.4.12), e foi criada uma EPI para cada altura (Fig.4.16 e Fig.4.17).

À altura de 60 pixel, o objeto possui forma circular. E à altura de 200, o objeto tem uma forma circular com pequenas reentrâncias.



**Fig.4.16: EPI de cilindro(altura = 60 pixel)**



**Fig.4.17: EPI de cilindro com reentrâncias (altura = 200 pixel)**

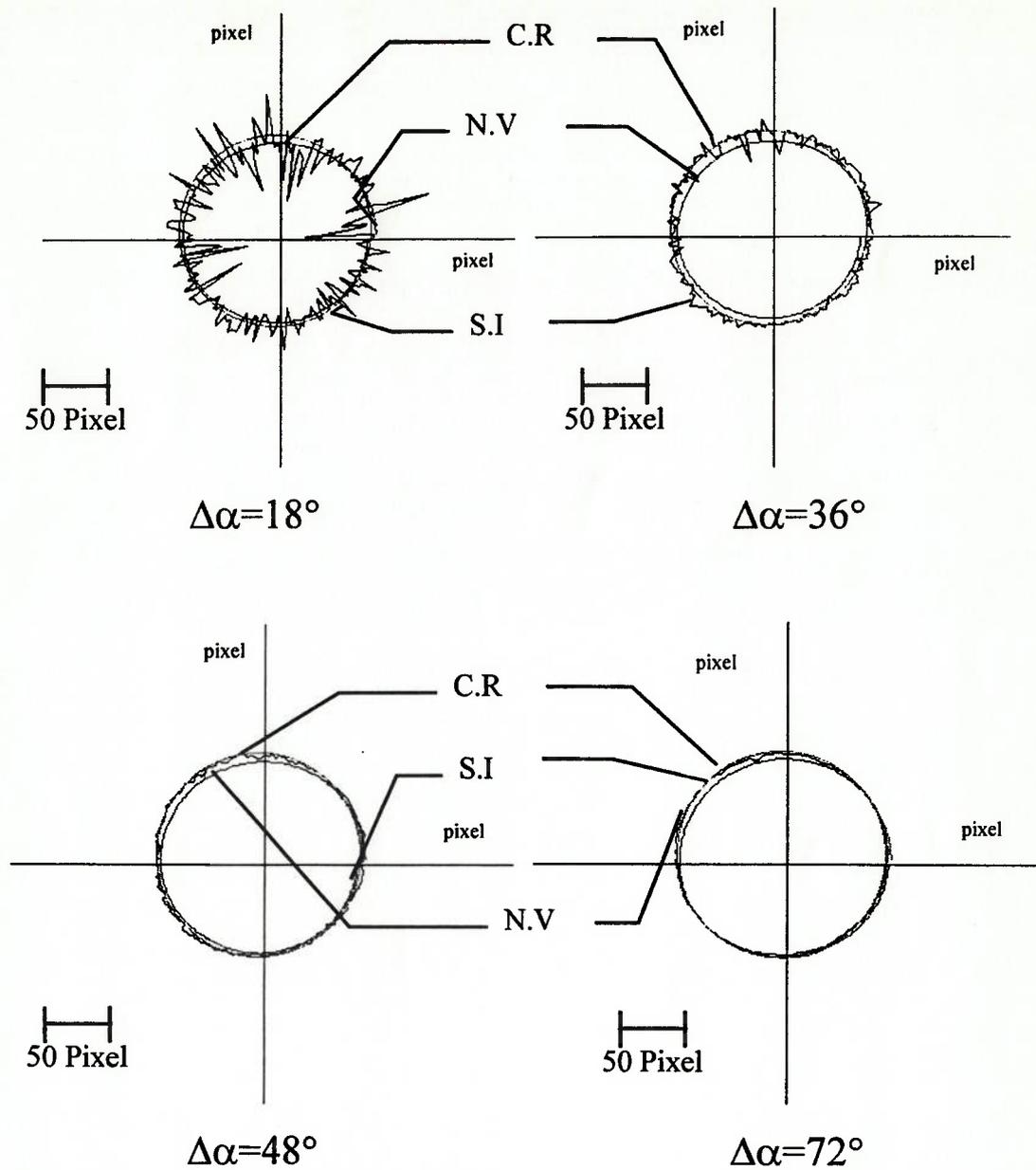
Na EPI da Fig.4.16 pode-se notar a presença de alguns pontos mais brilhantes que os outros. Estes pontos correspondem à riscos na superfície pintado como será mostrado adiante. Estes pontos irão influenciar a forma recuperada.

Por causa de falhas de alinhamento dos equipamentos, o centro da imagem da câmera CCD e centro de rotação da mesa giratória não coincidiram. Nesse caso a distância média do ponto mais à direita da EPI e mais à esquerda da EPI foi escolhida como a posição do centro de rotação  $x_0$  e os processamentos foram feitos.

#### **4.2.5 Resultados experimentais**

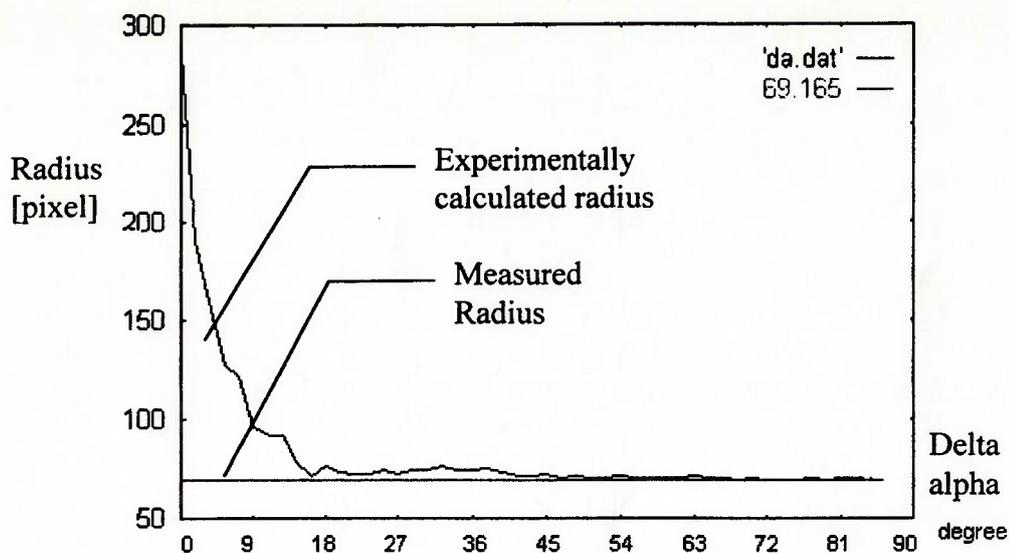
Com as EPIs, as forma foram recuperados usando diversos valores de  $\Delta\alpha$ . As formas recuperadas são apresentadas na fig.4.18 juntamente com o perfil real (circulo). Na figura, CR indica a forma do perfil real, NV, a da técnica do vetor normal e SI, a da técnica de identificação de trajetória senoidal.

Observa-se que quanto maior o  $\Delta\alpha$ , mais precisa a forma recuperada.



**Fig.4.18: Recuperação de forma cilíndrica Experimental**

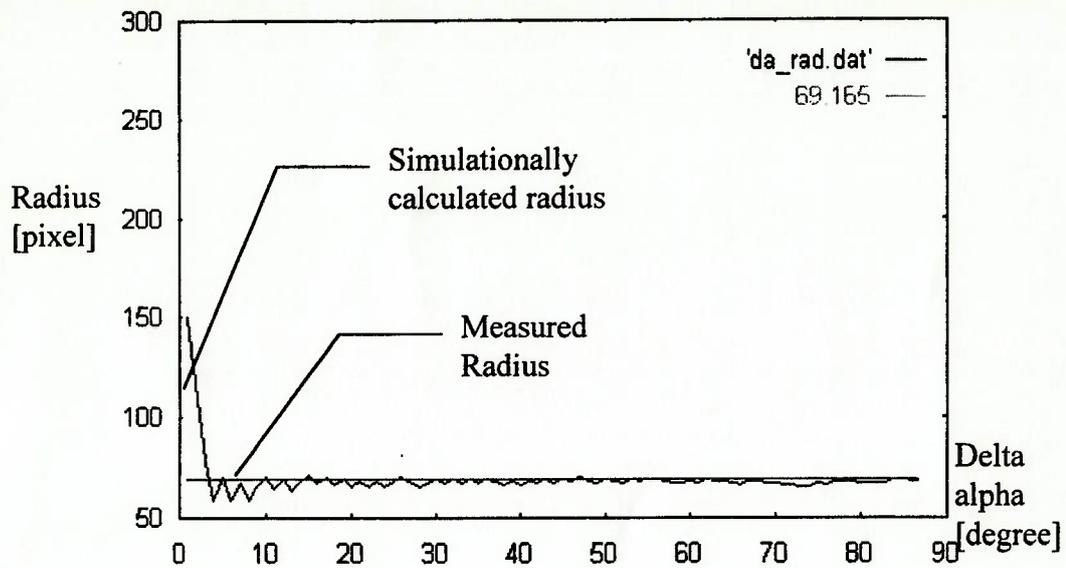
Para determinar a relação entre  $\Delta\alpha$  e o raio experimentalmente obtido, um ponto foi escolhido e examinada a relação.



**Fig.4.19: Delta alpha vs. raio calculado e experimental**

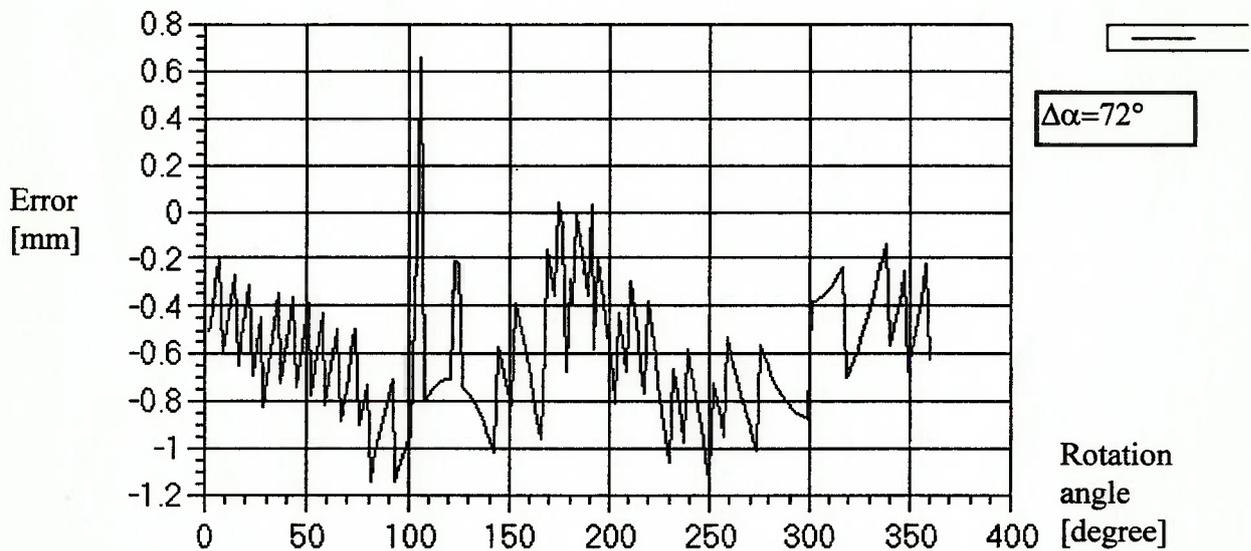
A Fig.4.19 mostra a relação entre  $\Delta\alpha$  e o raio experimentalmente obtido de um ponto do objeto. Com o aumento de  $\Delta\alpha$ , o raio se aproxima do raio nominal. Neste caso,  $\Delta\alpha$  deve ser maior do que  $45^\circ$  para se ter um erro de medição inferior a 5%. Já a Fig.4.20 mostra um gráfico análogo só que agora sem considerar o ruído. Neste caso, basta um  $\Delta\alpha > 10^\circ$  para se ter um erro de mesma ordem.

Ou seja, o ruído de câmera exige que se adote um valor maior de  $\Delta\alpha$  para recuperar satisfatoriamente a forma.



**Fig.4.20: Delta alpha vs. Raios calculados simulado**

Em seguida calculou-se o desvio com relação à forma teórica no caso de  $\Delta\alpha=72^\circ$ .

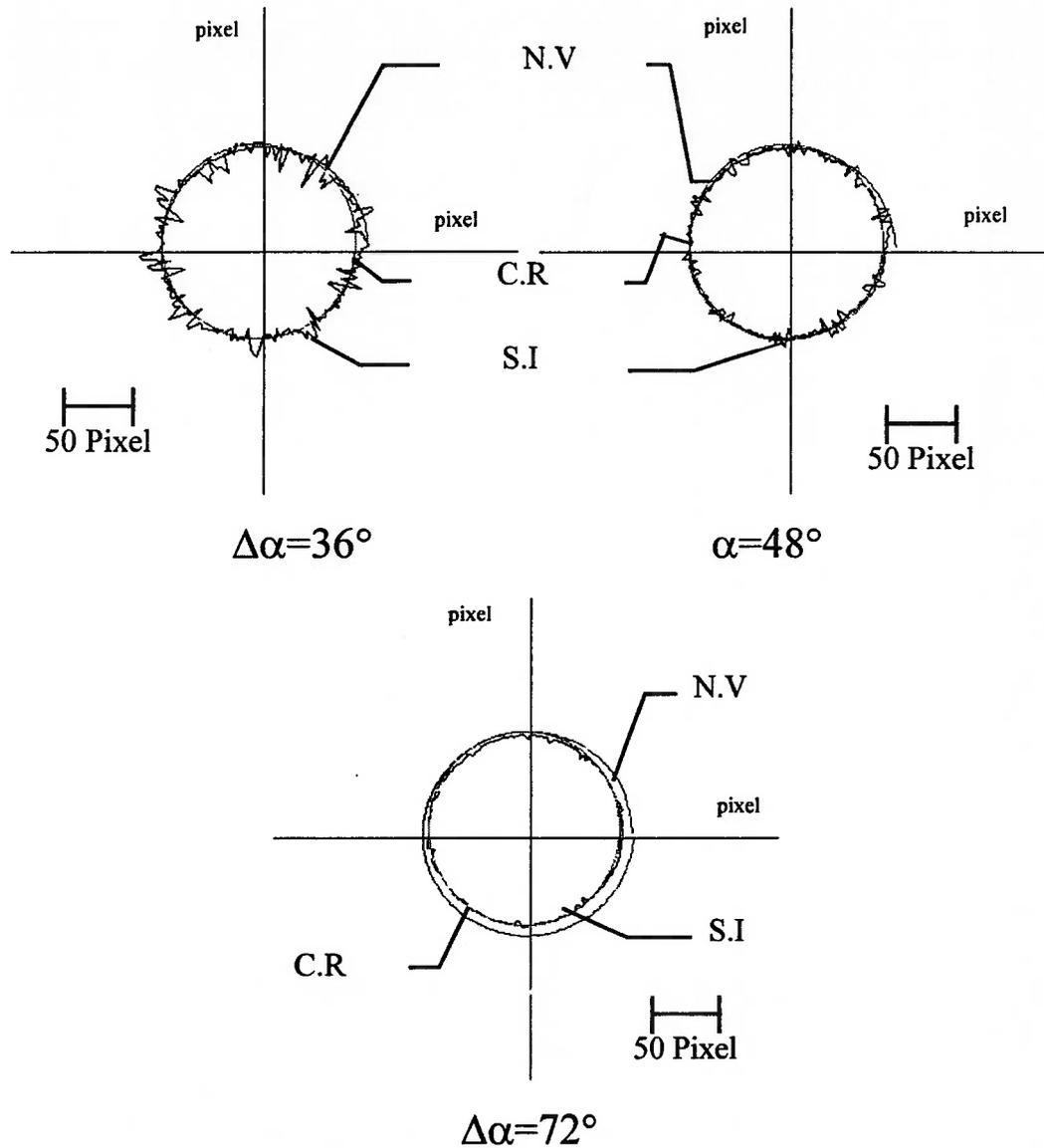


**Fig.4.21: Erros entre as formas experimental e teórica**

A Fig.4.21 mostra erro entre raios do objeto e raios calculados. raio teórico – raio calculado experimentalmente). O pico que se verifica na posição de 110 graus, foi causado pelo risco na superfície pintado. O erro máximo foi de 1.1 mm. Esse valor corresponde a 3% do raio do objeto.

#### 4.2.6 Recuperação da parte com reentrâncias;

A recuperação da parte com reentrâncias usando a EPI da Fig.4.17 foi feita e o resultado é mostrado na Fig.4.22.



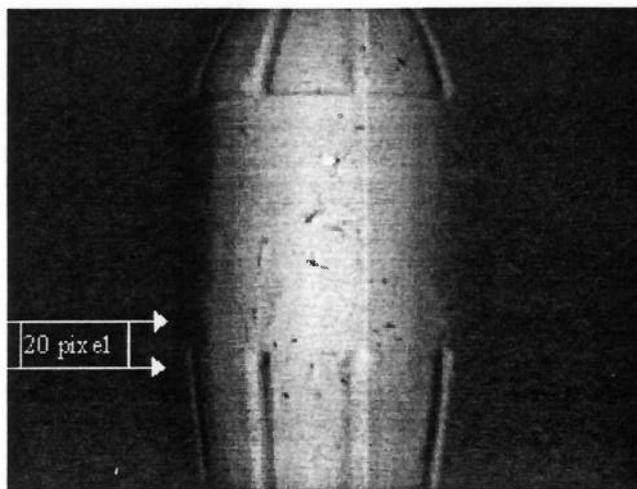
**Fig.4.22: Recuperação de forma com reentrâncias**

Na figura, CR indica o círculo de referencia (mostra a forma sem reentrâncias), SI, a forma recuperada pela identificação da trajetória senoidal e NV, a forma recuperada através de vetores normais.

A forma recuperada sugere a presença das reentrâncias mas a forma destas não pode ser recuperada satisfatoriamente. Através dos vetores normais não foi possível recuperar as parte com as reentrâncias, por que as mesmas são pequenas comparadas ao tamanho da imagem e a intensidade dos pontos nesta parte sofre uma mudança muito rápida. Um melhor resultado poderá ser obtido, aumentando-se a resolução da imagem e o nível de intensidade.

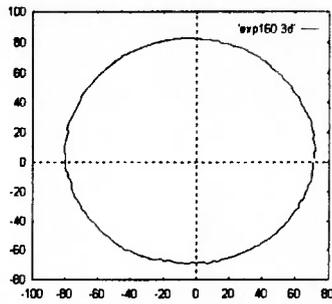
#### 4.2.6.1 Múltiplas imagens

Para recuperar o perfil do objeto (fig.4.11) à altura de 20 pixel (fig.4.23) foram recuperadas as formas de diversas seções do objeto, com o uso de um  $\Delta\alpha=72^\circ$ .

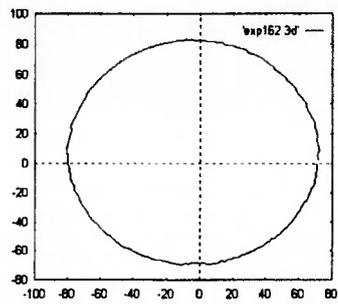


**Fig.4.23: Altura para recuperar Multe Imagem**

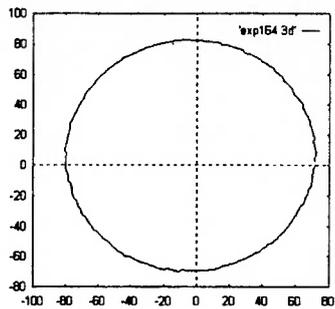
Variou-se a altura a de 2 em 2 pixels, e a cada altura foi recuperada a forma da seção transversal. Os resultados são mostrados a seguir.



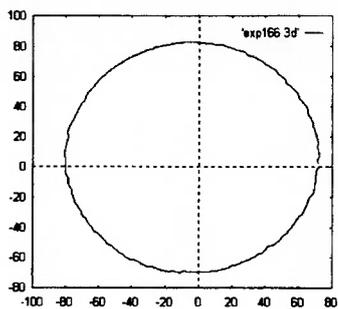
1st



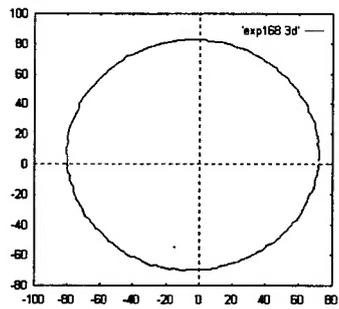
3rd



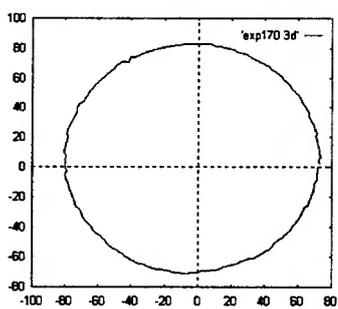
5th



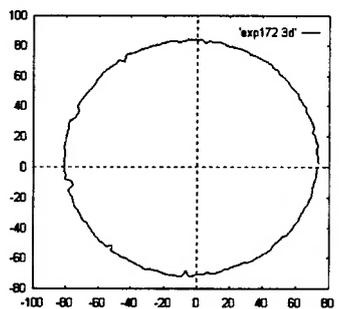
7th



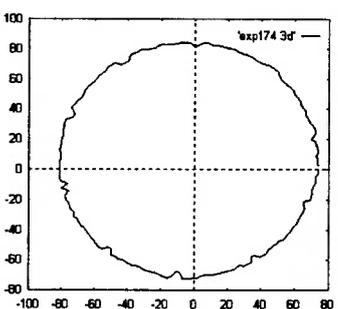
9<sup>th</sup>



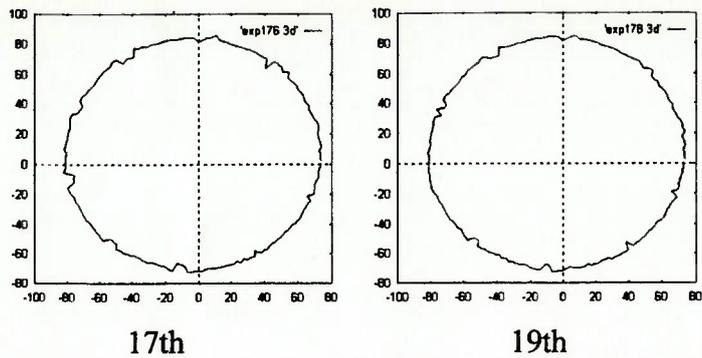
11th



13th

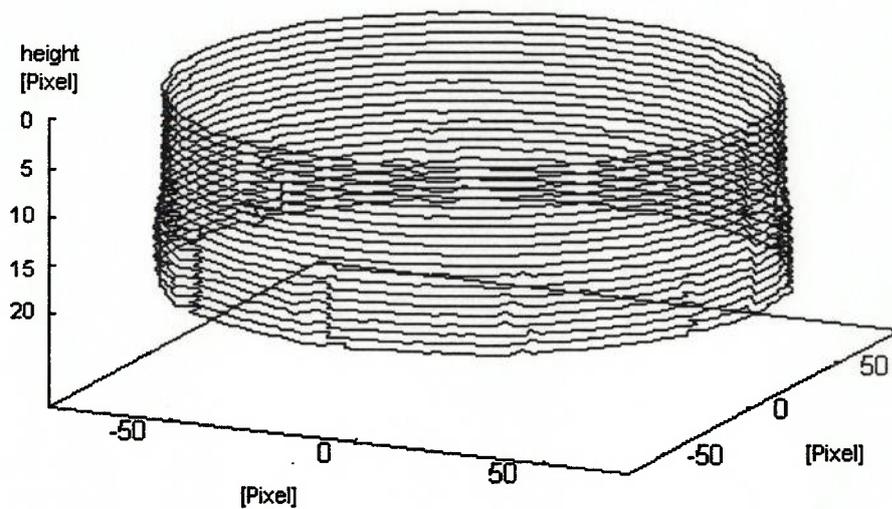


15th



**Fig.4.24: As formas recuperadas em diferentes alturas**

Pode-se verificar que a partir da 13ª forma, as reentrâncias já começam a aparecer. O perfil parcial do objeto construído com as 20 imagens é mostrado na Fig.4.25.



**Fig.4.25: A garrafa recuperada com  $\Delta\alpha=72^\circ$  na multe imagem**

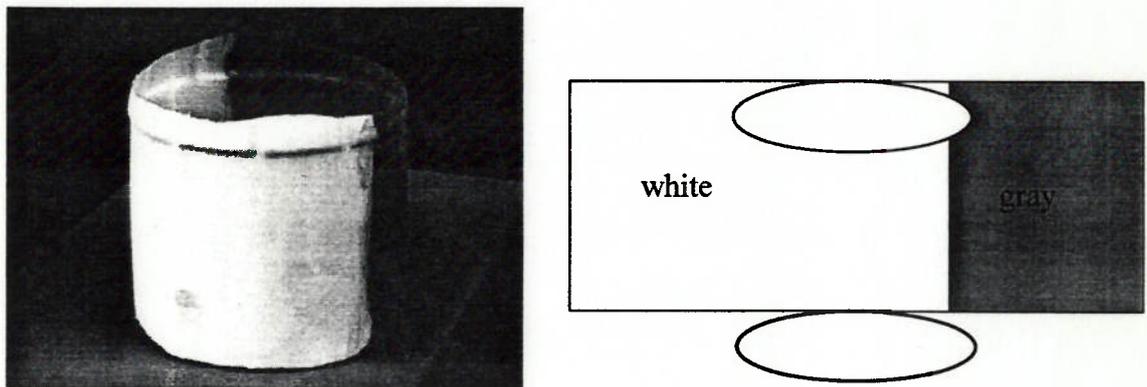
Apesar de cada forma recuperada não ter sido exatamente igual ao do objeto real, o perfil recuperado permite a identificação das reentrâncias e do trecho onde raio começa a aumentar.

#### 4.2.6.2 Experimento com condição complexas

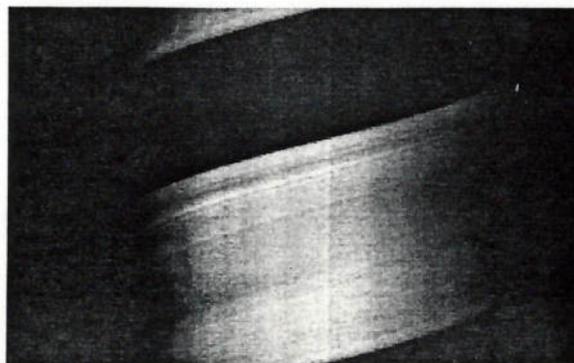
Para avaliar o método nos casos mais complexos foram realizados os seguintes experimentos.

#### 4.2.6.2.1 Cilindro com 2 cores.

Um experimento foi realizado para examinar se o método proposto permite recuperar a forma independente de não-uniformidades de fator de reflectancia na superfície do objeto. Foi recuperada a forma de um objeto cilíndrico com duas cores. A fig.4.26 mostra a foto do objeto (7/12 pintado de branco e 5/12, de cinza) e a figura do objeto aberto. A EPI obtida deste objeto é mostrada na fig.4.27.

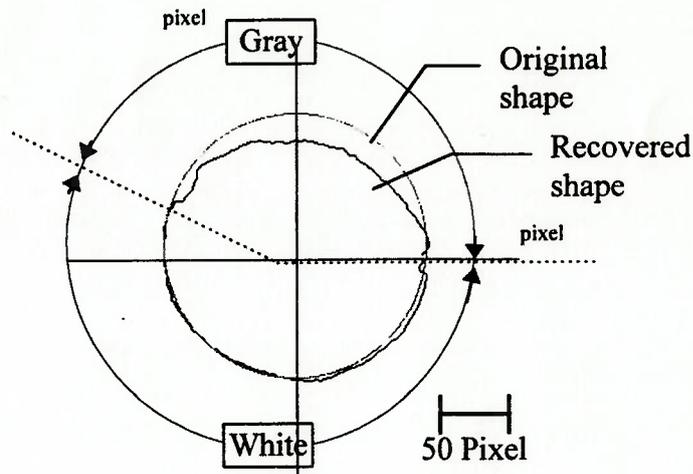


**Fig.4.26: Objeto com 2 cores**



**Fig.4.27: EPI do objeto com 2 cores**

Dessa EPI, a forma foi recuperada adotando-se  $\Delta\alpha=72^\circ$ . O resultado é apresentado na Fig.4.28 juntamente com a forma real.



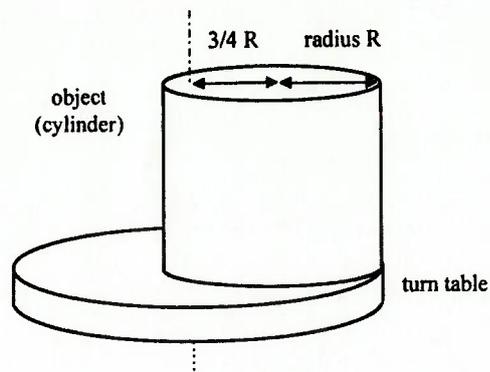
**Fig.4.28: Forma recuperada do objeto com 2 cores**

O trecho onde a forma recuperada se aproxima da forma original é o trecho pintado de branco. Já na porção pintada de cinza, a forma recuperada se desvia consideravelmente da forma real. O problema foi decorrente do fato de que apesar da função de ajuste automático da abertura da câmera ter sido desativada, tal função continuou agindo, resultando em oscilação no brilho (*brightness*) quando aparece somente a região branca na tela e quando aparece a região cinza na tela. Na EPI, é possível notar que a imagem da parte cinza não fica proporcionalmente escura comparado com a da parte branca. O problema foi identificado neste experimento, e acredita-se que se esse problema for resolvido, melhores resultados poderiam ser obtidos também nos experimentos anteriormente realizados, como no caso do objeto com cor única (Fig.4.7(c)).

#### 4.2.6.2.2 Cilindro deslocado do centro de rotação

Um experimento foi realizado para recuperar a forma de um objeto colocado longe do centro de rotação.

Especificamente, o objeto foi colocado a  $\frac{3}{4} R$  (raio do objeto) do centro de rotação (fig.4.29).



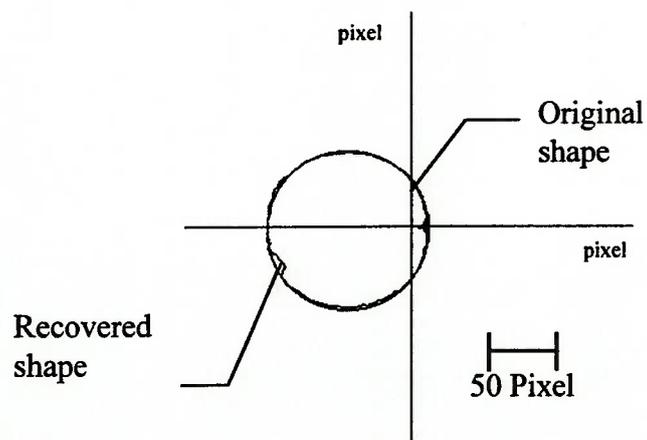
**Fig.4.29: Objeto deslocado do centro de rotação**

Nessa condição, foi obtida a EPI que é mostrada na fig.4.30.



**Fig.4.30 : EPI do objeto deslocado do centro**

Dessa EPI, a forma foi recuperada adotando-se  $\Delta\alpha=54^\circ$ .



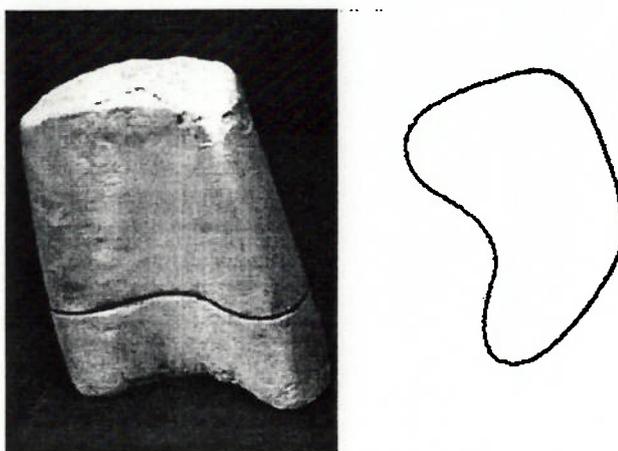
**Fig.4.31: A forma recuperada do objeto**

Na Fig.4.31, a forma recuperada apresenta desvios na parte à esquerda. Na EPI observa-se tem faixas baseando com uniforme de fatores de reflectancia da superficie.

A parte tinta rasgada deu ma influencia na recuperação desta parte. Totalmente a recuperação foi boa.

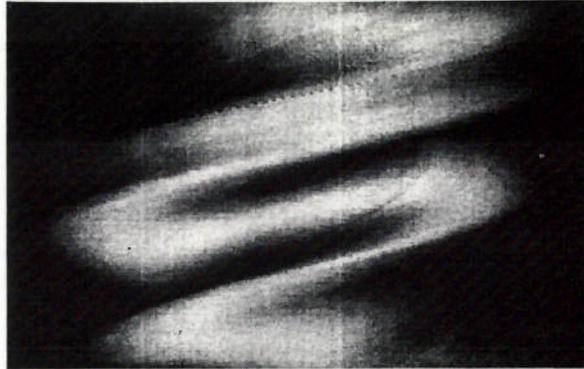
#### 4.2.6.2.3 Objeto complexo

Um experimento foi realizado para recuperara a forma de um objeto com forma relativamente complexa, conforme mostra a Fig.4.32. Foi selecionada a altura indicada na figura para a recuperação. A forma de seção transversal dessa altura é mostrado também na Fig.4.32.



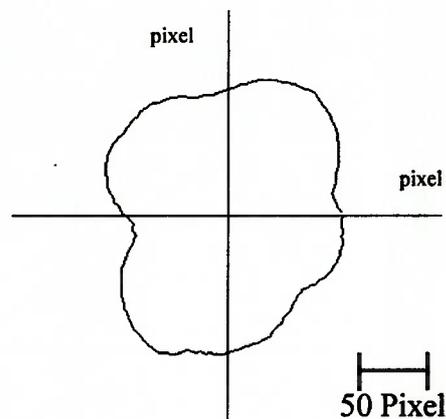
**Fig.4.32: Objeto com forma complexa e a seção transversal a ser recuperada**

Obteve-se a EPI do objeto à altura indicada e o resultado é dado na Fig.4.33.



**Fig.4.33: EPI do objeto complexo**

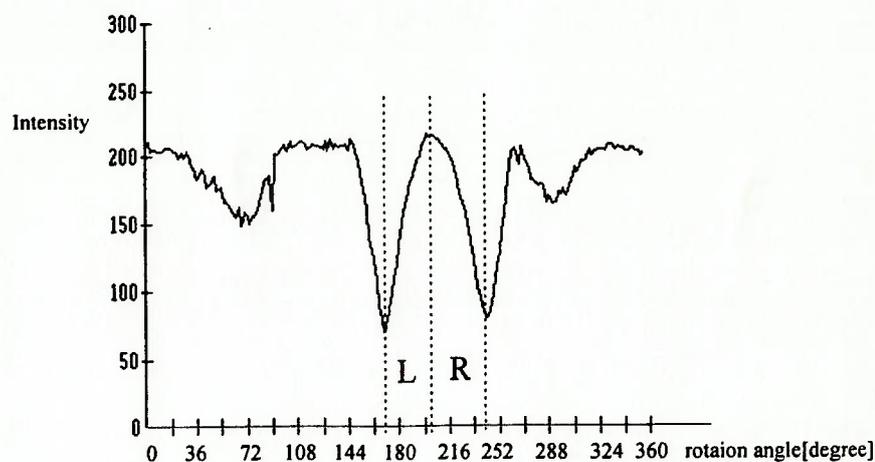
Com essa EPI, a forma foi recuperado adotando-se um  $\Delta\alpha$  fixo ( $=72^\circ$ ) e o resultado é mostrado na Fig.4.34.



**Fig.4.34: A forma recuperada com  $\Delta\alpha=72^\circ$**

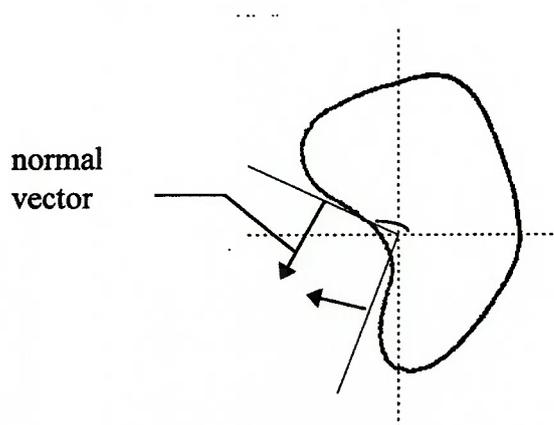
Observa-se no resultado que a reentrância maior não poder ser recuperada. Uma razão deste problema é que os pontos da reentrância possuem ângulos visuais limitados, ou seja, durante a rotação, tais pontos são escondidos pelas partes do próprio objeto, e portanto, não se pode nesse caso utilizar um  $\Delta\alpha$  muito grande.

Para resolver esse problema, foi primeiramente examinada a distribuição das intensidades na EPI de acordo com a posição angular de rotação. A Fig.4.35 mostra esta distribuição ao longo da linha vertical na EPI que corresponde ao eixo de rotação.



**Fig.4.35: Mudança de intensidade do centro da EPI**

Os dois grandes vales observados no gráfico, indicam a existência dos pontos acima referidos, os quais ficam escondidos a partir de um determinado ângulo de rotação. Os dois pontos do objeto, que produziram os dois vales no gráfico são indicados na fig.4.36. Observa-se que nos dois pontos, o ângulo do vetor normal assume um valor elevado, próximo de  $90^\circ$ .



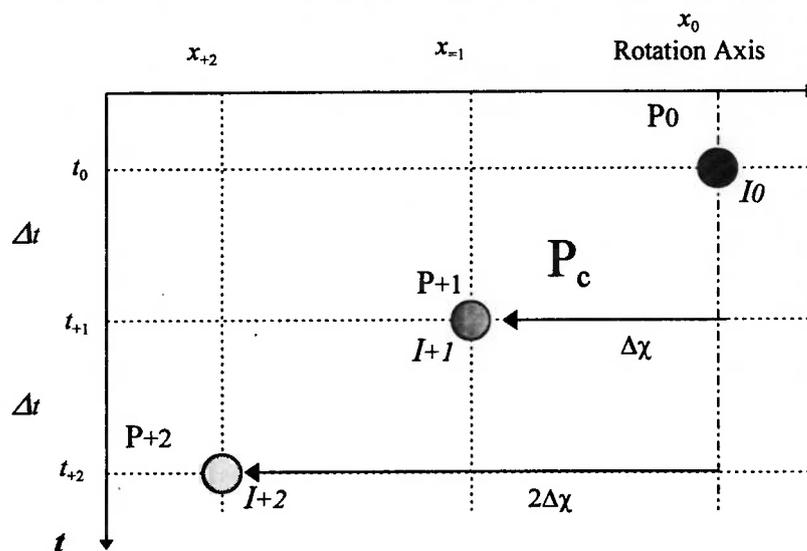
**Fig.4.36: Dois pontos que ficam escondidos durante a rotação**

Tais pontos são visíveis somente no semi-plano direito ou esquerdo na EPI correspondente. Neste caso, a trajetória senoidal deverá ser identificada utilizando-se somente um dos semi-planos, à direita ou à esquerda na EPI. Portanto, o algoritmo de

busca citado na teoria e utilizado até aqui, que sempre utiliza um ponto no centro de rotação e dois pontos simétricos, um à esquerda e outro à direita teve de ser modificado.

Identificados a partir da Fig.4.35 os locais onde parte da superfície do objeto ficam escondidas, distinguem-se duas regiões que foram indicadas pelas letras L e R na mesma figura. Até se L, o algoritmo é o mesmo utilizado até agora. Em L, a busca é feita utilizando-se pontos somente no semi-plano esquerdo e em R, somente no semi-plano direito. Passado R, volta-se ao algoritmo anterior.

No caso de um ponto que só se torna visível no semi-plano esquerdo da EPI, o ponto  $P_{-1}$  não poderá ser utilizado, e em seu lugar, será utilizado o ponto  $P_{+2}$  (fig.4.37).



**Fig.4.37 Caso do ponto visível somente no semi-plano esquerdo**

Intensidades da cada ponto pode ser descritas como segue

$$\begin{cases} I_0 = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos\theta \dots\dots\dots (13.1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{+1} = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos(\theta + \Delta\alpha) \dots\dots\dots (13.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{+2} = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos(\theta + 2\Delta\alpha) \dots\dots\dots (13.3) \end{cases}$$

Usando Eq.(13.2),(13.3), obtém-se:

$$\begin{cases} I_{+1} = \xi \cos(\varphi - \phi)(\cos \theta \cos \Delta\alpha - \sin \theta \sin \Delta\alpha) \dots \dots \dots (14.1) \\ I_{+2} = \xi \cos(\varphi - \phi)(\cos \theta \cos 2\Delta\alpha - \sin \theta \sin 2\Delta\alpha) = \\ = \xi \cos(\varphi - \phi)(\cos \theta \cos 2\Delta\alpha - 2 \sin \theta \sin \Delta\alpha \cos \Delta\alpha) \dots \dots (14.2) \end{cases}$$

Usando Eq.(13.1),(14.1),(14.2), obtém-se:

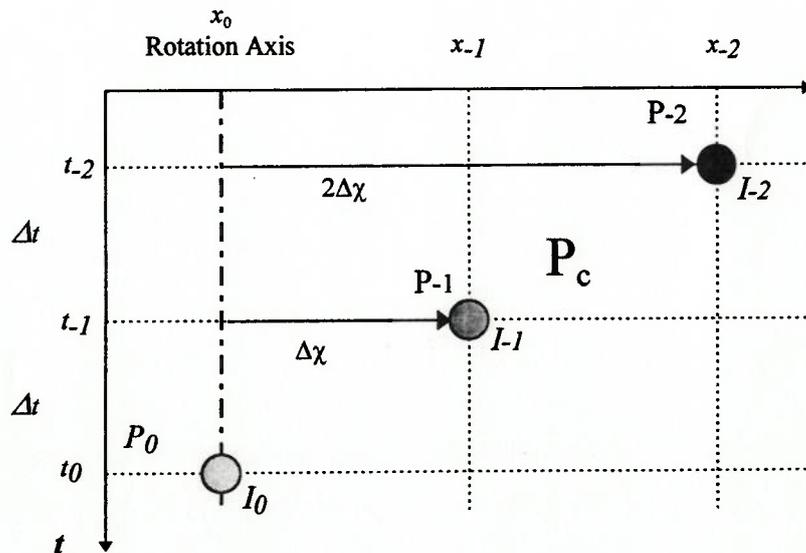
$$I_{+2} = I_0 \cos 2\Delta\alpha - 2(I_{+1} - I_0 \cos \Delta\alpha) \cos \Delta\alpha \dots \dots \dots (15)$$

Usando Eq.(15) função de avaliação é:

$$f(P_{+1}, P_{+2}) = | - I_{+2} + I_0 \cos 2\Delta\alpha - 2(I_{+1} - I_0 \cos \Delta\alpha) \cos \Delta\alpha | \dots \dots (16)$$

Os demais pontos,  $P_{+1}$  e  $P_{+2}$  passam a ser o par de pontos que deve ser procurado através da função de avaliação, Eq.(16), respeitando a condição de mesma distância entre os três pontos (Fig.4.37).

No caso complementar, de um ponto que só se torna visível no semi-plano direito na EPI, o ponto  $P_{+1}$  não poderá ser utilizado, e em seu lugar, será utilizado o ponto  $P_{-2}$  mostrado na Fig.4.38.



**Fig.4.38 Caso do ponto visível somente no semi-plano direito**

Intensidades da cada ponto pode ser descritas como segue

$$\begin{cases} I_0 = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos \theta \dots \dots \dots (17.1) \\ I_{-1} = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos(\theta - \Delta\alpha) \dots \dots \dots (17.2) \\ I_{-2} = \xi \cos(\varphi - \phi) \times \cos(\theta - 2\Delta\alpha) \dots \dots \dots (17.3) \end{cases}$$

Usando Eq.(17.2),(17.3), obtém-se:

$$\begin{cases} I_{-1} = \xi \cos(\varphi - \phi)(\cos \theta \cos \Delta\alpha + \sin \theta \sin \Delta\alpha) \dots \dots \dots (18.1) \\ I_{-2} = \xi \cos(\varphi - \phi)(\cos \theta \cos 2\Delta\alpha + \sin \theta \sin 2\Delta\alpha) \\ = \xi \cos(\varphi - \phi)(\cos \theta \cos 2\Delta\alpha + 2 \sin \theta \sin \Delta\alpha \cos \Delta\alpha) \dots (18.2) \end{cases}$$

Usando Eq.(17.1),(18.1),(18.2), obtém-se:

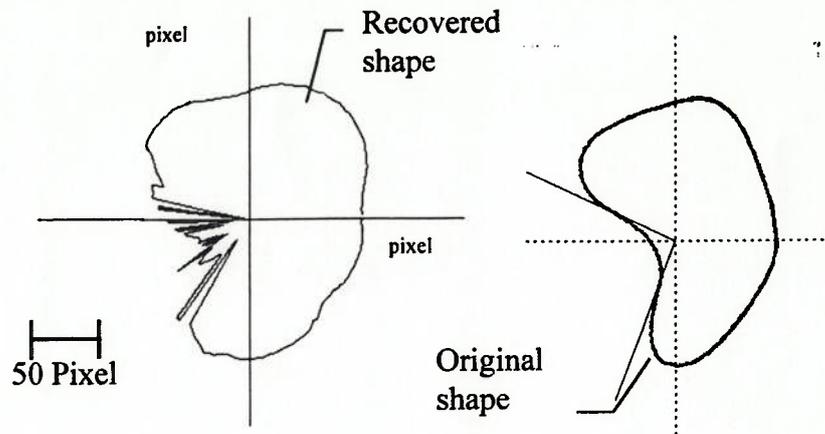
$$I_{-2} = I_0 \cos 2\Delta\alpha + 2(I_{-1} - I_0 \cos \Delta\alpha) \cos \Delta\alpha \dots \dots \dots (19)$$

Usando Eq.(19) função de avaliação é:

$$f(P_{-1}, P_{-2}) = |-I_{-2} + I_0 \cos 2\Delta\alpha + 2(I_{-1} - I_0 \cos \Delta\alpha) \cos \Delta\alpha| \dots (20)$$

Os demais pontos,  $P_{-1}$  e  $P_{-2}$  passam a ser o par de pontos que deve ser procurado através da função de avaliação, Eq.(20), respeitando a condição de mesma distancia entre os três pontos (fig.4.38).

As duas modificações foram introduzidas no algoritmo de recuperação e foi feita novamente a recuperação da forma do objeto com reentrância. A utilização de um algoritmo ou outro, é decidido com base na análise da distribuição de intensidade. Caso seja constatada a presença de um ponto escondido, passa-se a utilizar o algoritmo adequado para o caso. O resultado é mostrado na fig.4.39.



**Fig.4.39: A forma recuperada e seção transversal**

Comparando com a fig.4.34, a forma recuperada da reentrância foi melhorada. Os erros no fundo da reentrância ocorrem pois os pontos nesta região estão próximas do centro de rotação. E quanto menor a distância do ponto a ser recuperado do centro de rotação, maior será o efeito do ruído da câmera sobre a posição recuperada.

A forma aqui recuperada possui partes que são quase que planas. Também nestas partes, a recuperação não foi satisfatória e isto se explica pelo fato da mudança na intensidade ser pequena chegando a ser comparável ao nível de ruído da câmera.

#### **4.2.7 Tempo de Processamento**

O tempo de processamento para a recuperação de forma foi medido e foram feitas algumas estimativas.

A placa utilizada não permite gravar imagem em memória RAM, mas em forma de arquivo de imagem no formato "bitmap" (BMP) de 24bit (fixo) em disco rígido. As dimensões das imagens coletadas nas experiências foram de 320x240 pixel. Para a obtenção de uma EPI foram tomadas 200 imagens a uma velocidade de 1 imagem por

segundo. Gastou-se portanto 3 min 20 s para coletar as 200 imagens. Por outro lado, a preparação de uma EPI a partir das 200 imagens exigiu 70 s e a recuperação da forma a partir da EPI, 11 s. Inclua-se aqui o tempo gasto pelo computador para transferir os dados para o disco rígido e dele extrair.

O tempo total desde a aquisição das imagens até a recuperação total da forma foi portanto de:

$$200 \times 1s + 240 \times (70s + 11s) = 17.360s$$

ou seja, 4h 49min 20s.

Um tempo próximo de 5 horas para recuperar um objeto é certamente inadequado numa aplicação prática. Uma das providências para diminuir o tempo de processamento seria evitar que o fundo preto também seja processado - o que foi feito até agora, reduzindo 11 s, gastos em cada EPI na recuperação de forma. Outra providência seria o de deixar de obter as imagens na forma de BMP de 24 bit (full color), passando a fazê-lo na forma de BMP de 8 bit (256 cores ou níveis de cinza). Com isso, estima-se que o tempo de preparação da EPI diminua até aproximadamente 1/3. Só com estas providências, o tempo total poderá ser reduzido mais da metade.

Este tempo de processamento poderá ser diminuído mais ainda, colocando os dados provenientes da câmera diretamente na memória RAM do computador. Neste caso o acesso ao disco rígido poderá ser eliminado, reduzindo o intervalo de aquisição de cada imagem pela metade e eliminando o processo de leitura do BMP do disco rígido. Estima-se nestas condições um tempo de processamento de:

$$200 \times 0.5s + 240 \times 11s = 2.740$$

ou seja, 45min 50s.

E caso seja possível abrir mão da resolução da forma recuperada, é possível realizar o processamento a cada 2 ou 3 pixel de altura. E nesse caso, chegaríamos a um tempo razoável de processamento de 15 ~ 25 min, para recuperar a forma total do objeto.

### 4.3 Conclusões do capítulo

Nesse capítulo, foi feita uma avaliação do método de recuperação de forma proposto. Assumindo-se que os objetos tenham uma superfície com difusão perfeita e a iluminação através de luz com raios paralelos, foram feitas simulação de EPIs segundo 256 nível de cinza.

Através de EPIs simuladas, foi possível recuperar formas de maneira satisfatória mesmo usando um intervalo de ângulo de rotação relativamente pequeno ( $40^\circ$ ). Nos casos mais complexos (objeto deslocado do centro de rotação para examinar a recuperação a forma com vetor normal elevado, objeto com duas cores, para constatar a recuperação independente do fatores de reflectancia e objeto com parte plana, para examinar a recuperação com plano) o método recuperou as formas de maneira satisfatória, exceto no caso de cilindro com trecho plano. Nesse caso, a recuperação de forma através dos vetores normais se mostrou mais eficaz.

Na segunda parte deste capítulo foi feita uma avaliação do método em condições reais. Nesta parte verificou-se primeiramente que a câmera apresenta imagens com ruídos, e através de simulações verificou-se que o efeito de tal ruído sobre a precisão da forma recuperada, poderia ser reduzida consideravelmente adotando-se um intervalo de ângulo maior que com  $\Delta\alpha = 40^\circ$ .

Foi montado um aparato experimental composto por um micro-computador, uma mesa-giratória controlada por computador, uma câmera CCD, uma luminária de mesa e uma placa de aquisição de imagem. Para uma rotação completa da mesa foram tomadas 200 imagens (uma a cada  $1.8^\circ$  de rotação), a partir das quais foram preparadas as EPIs. Foi feita a recuperação da forma de um vasilhame plástico de refrigerante pintado. O erro máximo da forma recuperada com relação à forma real foi de 2 pixels no resultado correspondente a uma parte do vasilhame com seção circular. Isto corresponde a aproximadamente 1,1mm, para um diâmetro de 69,4mm. Já o resultado correspondentes à parte do vasilhame com uma série de pequenas reentrâncias apresentou imprecisões

consideráveis nas reentrâncias. Contudo, feita recuperação não somente de uma seção mas de uma trecho da forma total, a forma do vasilhame pode ser perfeitamente reconhecida, inclusive a presença das pequenas reentrâncias.

Em seguida, o método foi testado com objetos mais complexos de modo a verificar as limitações deste método. Para determinar a recuperação independente ao fatores de reflectancia de superfície de objeto, foi utilizado um cilindro com duas cores. Exceto problemas decorrentes de comportamentos imprevistos na câmera CCD, o resultado foi satisfatório. Um cilindro foi deslocado do centro de rotação, para determinar a recuperação de forma com vetor normal elevado e nesse caso a recuperação foi satisfatória. Foi feita a recuperação de uma de forma de uma complexidade maior, com reentrância. A reentrância exigiu ligeiras modificações no algoritmo de busca das trajetórias senoidais, pois a reentrância dava origem a pontos que são escondidos pelo próprio objeto durante a rotação. Mesmo com tais modificações, o resultado não foi satisfatório. Acredita-se que melhores resultados poderão ser obtidos através de algoritmos que permitam variar o ponto, em torno do qual a busca da trajetória é feita.

Os resultados das simulações mostraram desta forma a validade do método proposto neste trabalho. Com a exceção do caso mais simples (medição de um cilindro) em quase todas os casos de medição real os desvios observados forma relativamente grandes de modo que não se chegou a avaliar o método quanto a sua precisão.

Pelos experimentos , o tempo de processamento para recuperar a forma em algumas seções do objeto foram medidos e a partir disso estimou-se o tempo necessário para recuperar a forma total, chegando-se a um tempo de aproximadamente 5 horas. Este tempo poderá contudo ser reduzido drasticamente, evitando-se o armazenamento temporário das imagens em disco rígido, como foi feito nas experiências.

## 5. Conclusões

Neste trabalho, foi feita primeiramente uma revisão dos métodos convencionais para recuperação da forma, principalmente os baseados no processamento de imagem dada a simplicidade da montagem requerida e da versatilidade. Dentre os métodos de recuperação por processamento de imagem, foi focalizado o método do objeto em rotação (Rotating Object Method), cuja característica é a de exigir uma iluminação mais simples e o uso de uma única câmera. Aqui, o objeto é colocado sobre uma mesa giratória e colocada em rotação a uma velocidade constante e são obtidas imagens sucessivas durante uma rotação completa. Analisando-se através destas imagens a trajetória que os pontos do objeto descrevem na imagem obtêm-se a posição destes pontos na superfície do objeto. Na revisão verificou-se que trabalhos até agora apresentados sobre este método, restringem os tipos de objetos de medição de tal forma que os objetos não tenham reentrâncias ou tenham arestas ou não-uniformidades no fator de reflectância da superfície de modo que a trajetória dos pontos nas imagens seja facilmente identificável, mesmo através da visão humana. Contudo a existência de trajetórias bem visíveis nem sempre é necessária. Desde que a aquisição e o processamento das imagens poderá ser feito por uma câmera de vídeo e um computador, pequenas mudanças de intensidade de luz refletida pelo objeto de rotação poderão ser detectadas facilmente. Tendo-se além disso um modelo matemático que permita prever a mudança de intensidade conforme a rotação e a forma do objeto, é possível recuperar a forma somente com base na variação da intensidade nas diversas imagens.

Em função desta revisão, propôs-se um novo método no qual é feita somente uma restrição quanto ao objeto, a de apresentar reflexão com difusão perfeita na sua superfície. Neste método, o objeto é rotacionado a uma velocidade constante. Várias imagens são tomadas a cada ângulo de rotação. Para cada ponto da superfície do objeto, a sua trajetória é

identificada ao longo de todas as imagens com base num modelo matemático de variação da intensidade de luz refletida pelo objeto em função de sua rotação. Através da trajetória, a coordenada do ponto é determinada. Isto é feito para vários pontos da superfície do objeto e com isso se recupera a forma total do objeto.

Em seguida foi feita uma avaliação do método de recuperação de forma proposto. Assumindo-se que os objetos tenham uma superfície com difusão perfeita e a iluminação através de luz com raios paralelos, foram obtidas através de simulação, sucessivas imagens de um objeto em rotação e através destas imagens, recuperou-se a forma do objeto. Os resultados foram de modo geral satisfatórios mesmo nos casos mais complexos (objeto deslocado do centro de rotação para examinar a recuperação a forma com vetor normal elevado, objeto com duas cores, para constatar a recuperação independente do fatores de reflectancia e objeto com parte plana, para examinar a recuperação com plano), exceto no caso de cilindro com trecho plano. Nesse caso, a recuperação de forma através dos vetores normais se mostrou mais eficaz.

Foi feita ainda a avaliação do método com o uso de imagens reais. No primeiro experimento, o objeto escolhido foi um vasilhame plástico de refrigerante pintado, colocado ao centro de uma mesa giratória. Verificou-se desvios da forma real em decorrência de ruído na imagem da câmera, devido não-uniformidades na reflectância da superfície do objeto e ao desvio da mesma superfície da condição de difusão perfeita. Apesar disso, a recuperação de forma se deu de forma satisfatória. Assim como no caso anterior, da simulação, o método foi testado com objetos mais complexos. Para determinar a recuperação independente ao fatores de reflectancia de superfície de objeto, foi utilizado um cilindro com duas cores. Um cilindro foi deslocado do centro de rotação, para determinar a recuperação de forma com vetor normal elevado. Foi feita a recuperação de uma de forma de uma complexidade maior, com reentrância. Em todos os casos, os resultados apresentaram desvios de diversas intensidades com relação à forma real em função de fatores diversos, inclusive os já citados anteriormente. Mas em todos os casos a

forma aproximada dos objetos puderam ser recuperados. Ainda nesta parte, mostrou-se que o tempo necessário para a recuperação da forma total de um objeto é de aproximadamente 5 horas. Este tempo poderá contudo ser reduzido drasticamente, evitando-se o armazenamento temporário das imagens em disco rígido, como foi feito nas experiências.

Em função das grandes imprecisões que se verificaram nas formas recuperadas durante as experiências, não se chegou ao ponto de se discutir a precisão do método. Contudo os resultados tanto da simulação como das experiências demonstraram que o método proposto neste trabalho é válido. E também através dos experimentos ficam indicados os problemas a serem previstos na obtenção de alta precisão.

## **Trabalhos futuros**

O presente trabalho teve como principal resultado a proposição de um novo método para a recuperação da forma de objetos e a sua validação através de simulação e de experimentos. Como foi dito, não se chegou ao ponto de avaliar o método quanto a sua precisão. Isto foi em parte devido ao fato de ter sido empregado um algoritmo de identificação da trajetória dos pontos do objeto nas imagens na sua forma mais simples possível. Foram estudadas somente pequenas modificações, somente para possibilitar a medição de um objeto com reentrância. Em função disso, os resultados obtidos apresentaram grandes desvios decorrentes de fatores como ruídos da câmera, não uniformidades na reflectância da superfície, etc. Fica portanto como trabalho futuro, o tema "Aprimoramento do algoritmo para identificar a trajetória dos pontos".

O algoritmo usado neste trabalho foi simplesmente procurar para cada ponto em questão, um par de pontos na sua vizinhança que apresente a variação calculada para um dado ângulo de rotação. Este algoritmo não foi robusto o suficiente contra ruídos de câmera e não uniformidades na reflectância da superfície. Uma das soluções seria adotar, ao contrário

do que foi feito neste trabalho, um algoritmo que permita variar o ângulo de rotação para a busca, para o maior valor possível, de maneira automática. Outra solução, que pode ser adotada em conjunto com a anterior, é a de buscar não somente um par, mas uma combinação maior de pontos.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] Bryan,J.B.; Carter,D.L., **Design of a new error-corrected co-ordinate measuring machine**, Precision Engineering, Vol1,No.3,pp.125-128,1979
- [2] Fu,K.S., **Robotics: control, sensing, vision and intelligence**, McGraw-Hill International Editions, 1987.
- [3] Yatagai,Toyohiko, **Introduction to optical measurement**, Maruzen, Tokyo, 1994
- [4] Agui,Takeshi; Nagao,Tomoharu, **Computer Image Processing and Recognition**, Shoukoudou, Tokyo, 1994.
- [5] Woodham,Robert J., **Analyzing Images of Curved Surface**, Artificial Intelligence, Vol.17, pp.117-140, 1981.
- [6] Zheng,Jiang Yu, **Aquiring 3-D Models from Sequences of Contours**, IEEE Pattern analysis and machine intelligence, Vol 16,No.2, February 1994.
- [7] Hiura,Shinsaku; Sato,Kosuke; Inouchi,Seiji, **Simultaneous Measurement of Shape and Reflectance by Rotating Object**, MIRU'94, Vol.II, No.13, pp.279-286,1994
- [8] Ueda,Hiroyuki; Okutomi,Masatoshi, **Dense Shape Recovery of Rotating Object by Weighted Voting**, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineerings,1996

## 7. Anexos

### Schematic of Drive circuit of stepping motor

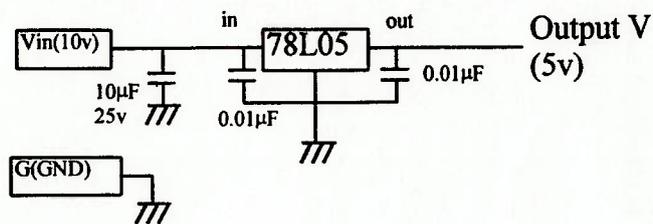


Fig.7.1: Circuito regulador

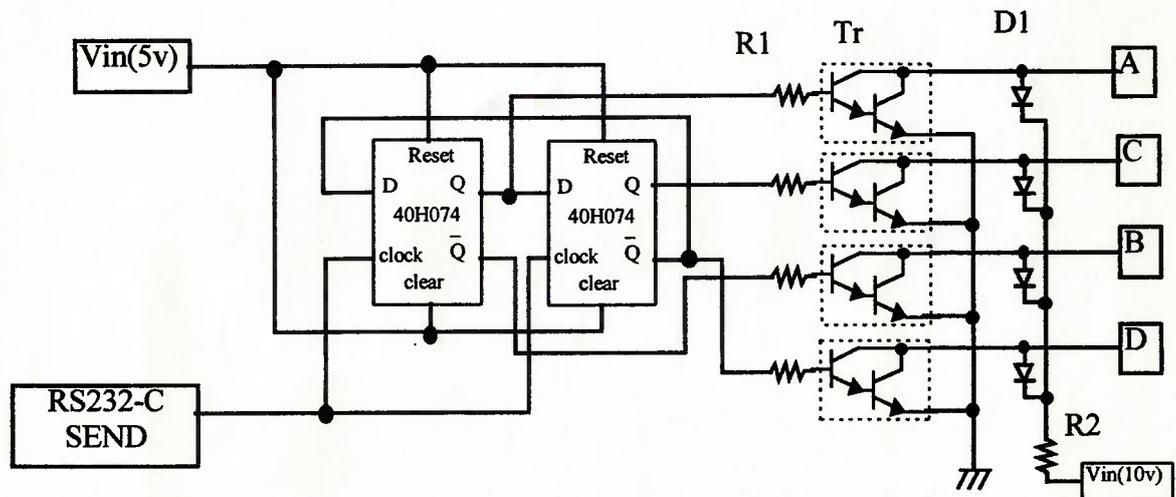


Fig.7.2 : Circuito de alimentação do motor de pano

IC : 40H074 (Dual D-FF) 14 pins

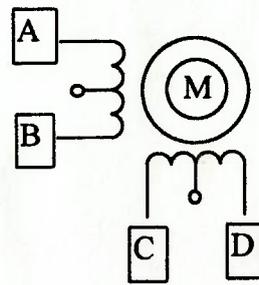
IC : 78L05 (100mA 5V output 3pins regulator IC)

D1: Sililcon diode 100V 1A

R1: 3.3K $\Omega$

R2: 68 $\Omega$

Tr : NEC D1590-2Y



**Fig.7.3 : Motor de pano**

Stepping motor : STH-39D137-01Z (SHINANO KENSHI CO. LTD JAPAN)

1.8 deg/step