



Geração de Trajetórias na Automação do Corte de Materiais Flexíveis

Walter de Britto Vidal Filho¹

Lucas Antônio Moscato²

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Prof. Mello Morais 2231, São Paulo- SP ,CEP:05508-900

Solly Andy Segenreich

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia
Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225- Rio de Janeiro- RJ

¹ E-mail: wbritto@usp.br & ² E-mail: lamoscat@usp.br

Resumo: *A indústria brasileira faz grande uso de materiais flexíveis, da classe dos tecidos, plásticos, papel e couro, e tais materiais necessitam ser processados com rapidez, precisão e qualidade. No caso da indústria do vestuário, o tecido é a matéria prima principal. O presente trabalho aborda a solução algorítmica do problema da geração automática da trajetória de corte para um protótipo de máquina CNC destinada ao corte de materiais flexíveis. Para tanto foi feito um algoritmo que extrai as trajetórias dos desenhos dos moldes feitos em CAD, previamente arquivados. Notou-se que a heurística, inicialmente adotada, poderia ser melhorada para otimização do tempo de corte, aumentando assim a produtividade. Mostrar-se-á aqui que o problema de gerar uma trajetória planar otimizada no tempo é o mesmo problema de gerar circuitos eulerianos, o qual pode ser resolvido por analogia com o problema do “carteiro chinês”.*

Palavras- Chave: Automação ,CAD/CAM, Geração de trajetórias

1. Introdução

Diante da globalização atual, as tendências do mercado mudam muito rapidamente e um sistema baseado em automação fixa pode ficar obsoleto antes mesmo de cobrir os custos de implantação. Na indústria têxtil, as tendências da moda são de grande influência na produção, gerando uma diversidade de produtos, de curta vida, que leva a uma variedade de moldes a serem cortados. Desta forma tem-se um cenário propício para o emprego de uma máquina de corte CNC. Foi desenvolvido uma máquina de corte computadorizada para materiais flexíveis (Vidal&Segenreich,98), que a partir de

um arquivo gerado em CAD , corta os moldes de tecido. Na indústria do vestuário o processo de corte é na sua maioria manual com cortadeiras elétricas de laminas alternantes. Antes de cortar o tecido, os moldes em papelão são distribuídos sobre uma folha de tecido de forma a ter o maior aproveitamento de área útil e depois o tecido é riscado. Este tecido riscado é colocado sobre um enfiesto¹ a ser cortado. No sistema automatizado desenvolvido na PUC-Rio os moldes digitalizados são encaixados na tela do computador de forma a obter o maior rendimento. Feito isto, o arquivo CAD é transferido para o sistema que controla a máquina de corte (Vidal&Segenreich,98), este sistema CAM extrai do arquivo em CAD a trajetória que a ferramenta de corte da máquina deve traçar para produzir os moldes.

Notou-se que a trajetória de corte inicialmente gerada neste sistema pode ser melhorada, eliminando-se ou reduzindo-se a trajetória de posicionamento a qual poderia ser eliminada ou reduzida. Desta forma todo o movimento da ferramenta de corte torna-se produtivo, diminuindo o tempo total de corte. Uma outra vantagem é a trajetória ser toda planar, pois não é necessário levantar a ferramenta para mudar de molde a ser cortado, simplificando a estrutura da máquina. Além disso, pode-se usar uma configuração de porta ferramenta excêntrica, inicialmente desenvolvida, que elimina a necessidade de controlar os três graus de liberdade da máquina (Vidal&Segenreich,98).

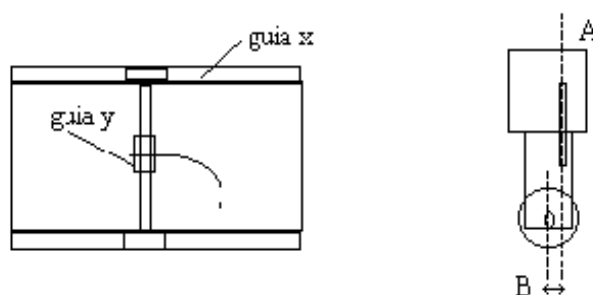


Figura 1- Esquema do porta ferramenta e da máquina

A configuração inicialmente utilizada não podia levantar a ferramenta para passar de um molde cortado para outro a ser cortado, pois necessitava do contato com o tecido para auto-alinhar o fio de corte com a trajetória de corte. Como porta-ferramenta é excêntrico as forças de contato no ponto de corte aliadas a força no ponto A, fig.1 , gera um momento que tende a girar a ferramenta para alinhá-la com a trajetória.

2. Geração da trajetória

O algoritmo de acionamento da máquina de corte, controla os atuadores da máquina baseado em um arquivo de deslocamentos relativos: Δx , Δy , $\Delta \theta$ e z ($= 0$ ou 1). Para obter este arquivo de deslocamentos, o programa extrai as informações de arquivos gerado via CAD. Estes arquivos fornecem uma lista com as coordenadas cartesianas dos vértices dos polígonos formados pelos moldes, em relação ao zero-máquina. Eles estavam em código ASCII e podem ser lidos e alterados por qualquer editor de texto. A

¹ Termo usado na indústria para nomear uma pilha de várias camadas de tecido

fig. 2, mostra um molde retangular a ser cortado sobre uma folha e em seguida a tabela1 mostra os respectivos dos deslocamentos gerados.

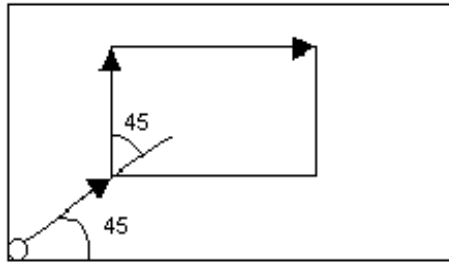


Figura 2: trajetória de corte de um molde retangular

O arquivo CAD fornece um tabela das coordenadas dos vértices, como na tabela 1A. Partindo desta tabela o programa CAM, que controla a máquina, tem que gerar as trajetórias intermediárias de posicionamento, bem como converter todos os deslocamentos para deslocamentos relativos, tabela 1B.

Tabela 1: a) tabela dos vértices b) tabela de deslocamentos relativos

x	y
10.0	10.0
10.0	20.0
20.0	20.0
20.0	10.0

z	Δx	Δy	$\Delta \theta$
0	0.0	0.0	45
1	10.0	10.0	0.0
0	0.0	0.0	45
1	0.0	10.0	0.0
0	0.0	0.0	-90
1	10.0	0.0	0.0
0	:	:	:

A heurística inicialmente adotada para gerar a trajetória de corte, privilegia fechar cada molde antes de passar para o próximo, ou seja, corta-se todo o contorno externo do molde antes de começar a cortar o próximo molde. A premissa de fechar cada molde antes de partir para o próximo, está relacionada a fatores tecnológicos, tais como precisão de deslocamentos devido a folgas no sistema de movimentação da ferramenta. Como se pode observar, a questão da escolha da seqüência dos moldes a serem cortados é de suma importância, pois vai gerar uma trajetória de posicionamento que pode desperdiçar tempo e diminuir a produtividade. Um técnica já utilizada na geração de seqüência de corte em máquinas CNC de corte oxi-acetileno e a laser, divide a chapa em faixas de mesmo tamanho (Geiger&Kolléra,98) e os moldes, agrupados desta forma, são percorridos no sentido do comprimento das faixas fig. 3.

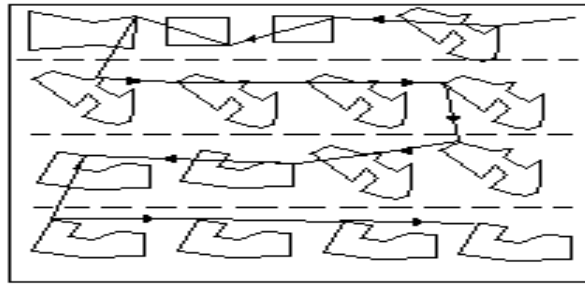


Figura 3-Sequência de corte pela estratégia de dividir em faixas

Mesmo sendo esta uma boa estratégia de geração de trajetória, ela não garante uma trajetória otimizada. Uma aplicação que também evidencia a necessidade de obter boas trajetórias é a geração de trajetórias em plotter de grande dimensão. A heurística inicialmente adotada para máquina de corte, segue o seguinte algoritmo: Partindo do zero-máquina o programa busca o molde mais próximo, que será aquele que possui o vértice mais próximo deste ponto. Gera a trajetória de posicionamento do zero-máquina até este ponto e a partir deste percorre todos os vértices da figura, gerando o caminho de corte. A figura é percorrida em sentido horário, que é o sentido em que ela foi arquivada. A finalidade de estabelecer um sentido de armazenamento dos vértices, está no fato de embutir a informação de adjacências, deste. Após retornar ao ponto de início do corte, busca-se o molde mais próximo, que é aquele que possui o vértice mais próximo deste ponto e assim repete-se o procedimento anterior. A fig. 3 abaixo ilustra este algoritmo.



Figura 3: a) Moldes a serem cortados e b) trajetórias de corte dos moldes

Como pode-se observar esta heurística pode ser melhorada, pois a mesma não garante uma trajetória otimizada. Pela fig. 4 a seguir, este fato pode ser visto.

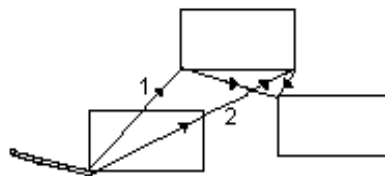


Figura 4: trajetórias de posicionamento

Existe outra trajetória de menor comprimento (2) unindo os moldes, como pode ser visto na fig.4. A otimização global da trajetória, não depende da escolha da melhor trajetória entre moldes, dois a dois, pois a escolha do próximo ponto depende da escolha do ponto anterior. Este problema é semelhante ao problema do “caxeiro viajante”, o qual deve percorrer um conjunto de cidades ligadas por estradas, passando uma única vez em cada e retornando à cidade de origem percorrendo o menor caminho possível (Lins&Kernighan,73). Esta semelhança já tem sido notada em outros problemas de geração de trajetória, em (Suk &Yang,96) a geração de trajetórias de usinagem de cavidades é resolvida pela analogia com o problema do “caxeiro viajante” e pelo emprego de redes neurais. Em (Geiger&Kolléra,98) usa-se também esta analogia para gerar uma trajetória otimizada no corte plano a Laser. Esta última heurística é a melhor solução para a premissa de fechar cada contorno antes de partir para o próximo. Mostra-se neste artigo que para obter a melhor trajetória no tempo tem-se que abandonar esta premissa. Devido a fatores tecnológicos, alguns processos não podem dispensar tal premissa, contudo no corte de tecido aqui descrito, pode-se dispensá-la. Pois a precisão dos deslocamentos são maiores que a requerida pelo setor.

3. Otimização da Trajetória

Como observado, a trajetória de corte pode ser melhorada reduzindo o tempo de corte pela redução do percurso. Uma maneira de reduzir o percurso é reduzir as trajetórias de posicionamento ao máximo. O ideal é que todo movimento seja produtivo, isto é, só de corte. A eliminação do movimento de levantar a ferramenta para mudança de molde, também é uma economia de tempo de corte.

Esta questão consiste em achar a mínima trajetória entre os moldes, como também as trajetórias que passam por todas as arestas sem repeti-las. Este problema, a primeira vista, é semelhante aos problemas de teoria dos grafos (Gibbons,85).

Um dos primeiros problemas da teoria dos grafos e que deu origem a este ramo da matemática foi o problema das pontes de Krönigsberg, um vilarejo formado por duas ilhas em um rio tendo 7 pontes ligando as ilhas entre si e as margens, como na figura 5 abaixo:

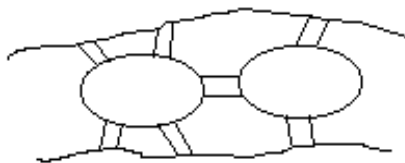


Figura 5-As ilhas e pontes

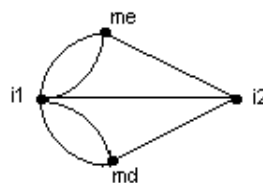


Figura6-grafo correspondente

O problema consistia em percorrer o vilarejo passando por todas as pontes uma única vez e voltar a margem de origem. Euler, estudando o problema, gerou o grafo figura 6, onde os nós correspondem as ilhas (i_1, i_2) e as margens(m_d, m_e), e as linhas correspondem as pontes. Por este grafo ele mostrou que era impossível percorrer todas as pontes passando uma única vez por cada. Pois existe vértices de grau ímpar, ou seja um número ímpar de arestas saindo de um vértice (Boaventura,79). Desta forma surgiu a teoria dos grafos, que são divididos quanto ao problema de percurso em Eulerianos e

Hamiltonianos (Boaventura,79). Os Eulerianos, a exemplo do problema anunciado acima, consistem em achar um percurso que percorra todas as arestas só uma única vez. E os Hamiltonianos que se caracterizam pela premissa de passar por todos os nós ou vértices. Um problema hamiltoniano clássico é o do “caxeiro viajante”, já comentado (Lins&Kernighan,73).

Abrindo mão da premissa de fechar cada molde antes de partir para outro, não temos só um problema Hamiltoniano que pode ser resolvido por analogia, mas uma combinação de ambos. Um problema Euleriano no que diz respeito a percorrer todas as arestas uma única vez e um problema Hamiltoniano na geração de caminhos entre os moldes. Uma estratégia analisada foi a colocação de “pontes” entre os moldes, que são as menores arestas ligando dois moldes, as quais podem ser percorridas na ida e na volta. Sendo assim, podemos obter um percurso Euleriano passando por todos os moldes, servindo-se das pontes para mudar de moldes. Podemos ilustrar esta estratégia pela fig.7.

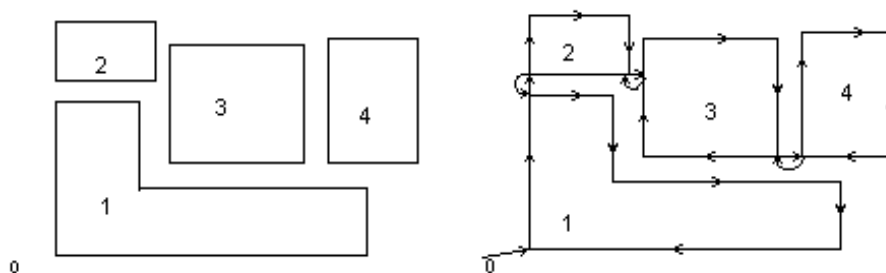


Figura 7-Conjunto de moldes e trajetória de corte usando “pontes”

A colocação de uma aresta ligando dois moldes, cria vértices de grau ímpar o que implica no mesmo ter de ser percorrido duas vezes para se ter um percurso Euleriano por todos os moldes. Por isso foram chamadas de pontes, pois são percorridas nos dois sentidos e só servem de ligação entre moldes. A heurística adotada para tal caso é a seguinte:

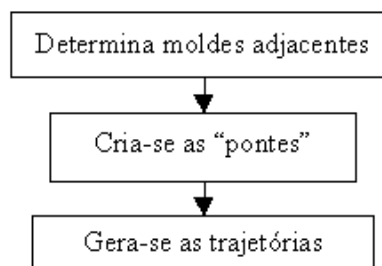


Figura 8-Procedimentos da heurística adotada.

No bloco ‘determina moldes adjacentes’ é realizado a determinação dos moldes mais próximos uns dos outros, em seguida no bloco ‘cria-se as pontes’ determina-se, dois a dois, os vértices mais próximos entre dois moldes para gerar as pontes. Feito isso, partindo do molde mais próximo da origem traça-se a trajetória percorrendo os moldes no sentido horário até achar uma ponte, adiciona-se à ponte a trajetória que está sendo gerada e passa-se ao molde adjacente ligado pela mesma. Percorre-se este molde até encontrar outra ponte, quando, novamente, ocorre a mudança de molde. Este

procedimento se repete até que se atinja uma ponte já percorrida, onde começa o retorno a origem.

Na fig. 9, observa-se duas trajetórias de posicionamento sobre um mesmo arranjo, a fig.9a usa a técnica do “caixeiro viajante” (Geiger &Kolléra,98) e fecha cada molde antes de partir para o próximo, a fig. 9b usa o conceito das pontes para gerar uma trajetória com mínimo percurso de posicionamento.

Analisando a fig. 9, conclui-se que se nenhum fator tecnológico exigir a premissa de fechar cada molde, a estratégia de usar pontes reduz ao máximo as trajetórias de posicionamento. Contudo, no corte de materiais flexíveis como o tecido, o problema de gerar a ‘ponte’ não vai existir pois a necessidade de máximo encaixe, faz com que os moldes se toquem. Como a limitação para o máximo encaixe é a sobreposição das figuras, sempre haverá no mínimo um ponto de contato entre os moldes.

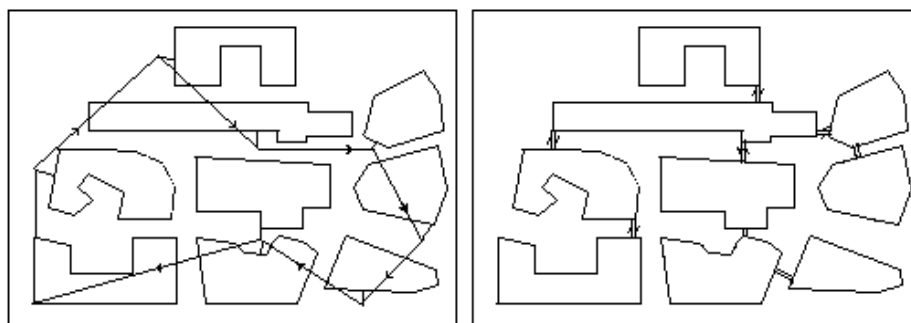


Figura 9-Trajétoria de posicionamento por a) ‘caixeiro viajante’ b)uso de ‘pontes

Existindo só um ponto de contato entre os moldes fig.10, teríamos um grafo euleriano pois só teríamos vértices de grau par. Com isso não seria difícil obter um algoritmo que gerasse um caminho partindo da origem percorresse todo o arranjo e voltasse a origem, sem repetir arestas. Contudo nem sempre isso ocorre, havendo contatos de arestas (fig.11).

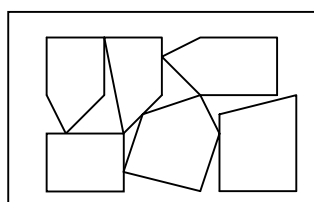


Figura 10-contatos por pontos

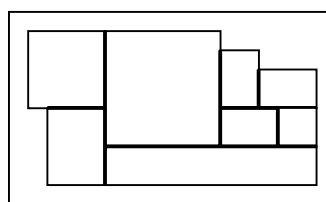


Figura 11-Contatos por arestas

Como se pode observar, a necessidade de máximo encaixe complica o procedimento de achar um caminho através de todas as arestas, sem repetir nenhuma e voltar a origem. Neste caso algumas arestas deverão ser repetidas. O problema agora é achar o caminho que repita o mínimo de vezes cada aresta de forma que o percurso total seja mínimo. Este problema é análogo ao problema do ‘carteiro chinês’, proposto em (Mei-Ko,62), no qual um carteiro tem de percorrer todas as ruas da cidade, repetindo o mínimo possível de ruas de forma que o percurso total seja mínimo. A solução fechada

para este problema foi demonstrada em (Edmonds,73). O algoritmo proposto em (Edmonds,73) reduz o problema do ‘carteiro chinês’ em um problema de ‘matching’, o qual vai determinar quais arestas devem ser repetidas, gerando um novo grafo que é euleriano. Quando ocorre contatos entre arestas cria-se um conjunto de vértices de grau ímpar, que pelo teorema de euler vai necessitar ser repetido para que o grafo seja todo percorrido, pois a repetência das arestas torna os vértices de grau par, condição excênial. A questão é quais arestas devem ser repetidas de formas que se tenha o menor caminho.

O problema de ‘matching’ consiste em agrupar dois a dois os vértices de um grafo, de forma que os pares não contenham vértices repetidos. Como será mostrado, a solução do problema de gerar um caminho pelo grafo que seja o menor possível, se resume o de agrupar os vértices de grau ímpar dois a dois. Na fig. 12 tem-se um encaixe de seis moldes, resultando na sobreposição de sete aresta e o aparecimento de seis vértices de grau ímpar(v1,v2,v3..v6). Para haver um caminho euleriano tem-se que ter só vértices de grau par, para tanto termos que acrescentar uma arestas em cada vértice de grau ímpar. Portanto as arestas devem começar em um vértice de grau ímpar e terminar em outro de grau ímpar, o que equívale a agrupar os vértices de grau ímpar dois a dois(fig. 13). Determinando assim as menores arestas unindo dois vértices ímpar, estamos determinando os caminhos que devem ser repetidos que minimizam o percurso.

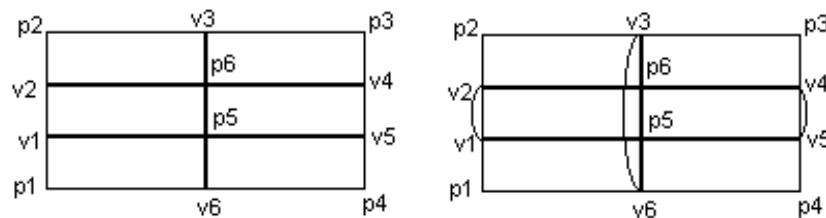


Figura 12-Determinação dos vértices ímpar Figura13-Agrupamentos dos vértices ímpar

Feito isso basta acrescentar ao grafo estas arestas e iniciar um algoritmo de buscar por

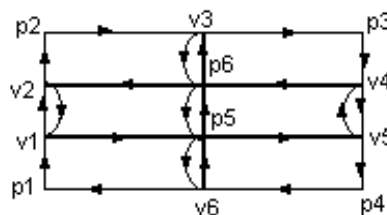


Figura 14- Geração de um caminho euleriano

um caminho euleriano no grafo. Para grafo da figura 14, temos o seguinte caminho encontrado: p1-v1-v2-p2-v3-p3-v4-v5-p4-v6-p5-p6-v3-p6-v2-v1-p5-v5-v4-p6-p5-v6-p1.

Como se pode observar , satisfeita as condições do teorema de Euler, existirá um ou mais caminho euleriano, com o mesmo comprimento, por tanto qualquer um destes que for encontrado é solução do problema.

4. Conclusão

O problema da otimização de trajetórias 2D, apesar de ter sido resolvido por várias heurísticas, não apresentava uma solução matematicamente fechada. O presente trabalho veio mostrar que esta solução reside em uma analogia com um problema estudado em outro campo do conhecimento. Isto vem ressaltar a necessidade de um conhecimento geral.

Comparando a heurística inicialmente adotada na máquina de corte, a qual fecha cada molde antes de partir para cortar o próximo, com a heurística baseada no problema do carteiro chinês para o caso da figura 14 tem-se uma análise quantitativa da otimização. Especifica-se inicialmente que cada retângulo a ser cortado (fig.14) tenha 30x40 cm. A heurística inicialmente adotada gera uma trajetória de posicionamento de 130cm, mais 250cm de trajetória repetida e mais 590cm de trajetória útil (efetiva de corte). A heurística baseada na analogia gera uma trajetória repetida de 150cm, mais 590cm de trajetória útil. No total tem-se uma redução em relação a trajetória gerada pela primeira heurística de 23.7%, ou seja, neste caso há uma redução no tempo total de corte de 23.7%, pois o tempo de corte é diretamente proporcional ao comprimento da trajetória. Dependendo da disposição dos moldes a serem cortados a redução de tempo de corte pode oscilar em torno deste percentual.

A grande vantagem de resolver este problema pela analogia com o problema do “carteiro chinês” não está só na redução do tempo de corte, mas na vantagem de poder efetuar o corte de todos o moldes sem ter que levantar a ferramenta. A vantagem de não necessitar perder o contato com o material a ser cortado é grande, pois permite a utilização de novas configurações de porta-ferramenta e ferramenta de corte que reduzem os custos da máquina e abrem novos campos de utilização. Pode-se pensar no corte de grandes enfeitos com laminas alternantes, o que não seria possível de cortar sem levantar a ferramenta para mudar de molde a ser cortado.

Referências

- Boaventura Netto, P. O, 1979 ; *Teoria e Modelos de Grafos*, São Paulo, E. Blücher
- Edmonds, J, 1973 ; *Matching, Euler tours and the Chinese postman*, mathematical programming 5 ,88-124. North-Holland Publishing Company
- Gibbons, Alan, 1985 ; *Algorithmic Graph Teory*, 1 ed , Cambridge University Press
- Geiger, M & Kolléra,H, 1998; *Trajatória da Ferramenta para Corte a Laser 2D*, Máquinas e Metais, No 394, Aranda editora -SP, novembro
- Geiger, M & Kolléra,H, 1993; *Workshop oriented technology planning for laser cutting machines*. In: Proc. Of the 25th CIRP international seminar on manufacturing systems, Blend, Slowenia.
- Han G.C & Na S. J, 1998; *Global Torch path generation for 2D laser cutting process using simulated annealing*, Intelligent automation and soft computing 4: (2) 97-108
- Lins, S e Kernighan, B. W, 1973; *An Efetive Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem*, operations research, vol 21, No 2, Abril
- Mei-Ko, K, 1962; *Graphic Programming Using Odd or Even Point*, Chinese Mathematics 1 273-277

Suk-Hwan Suh & Yang-Soo Shin, 1996; *Neural Network Modeling for Tool Path Planning of the Rough Cut in Complex Pocket Milling*, Journal of manufacturing Systems Vol 15 No 5

Vidal Filho, W B. & Segenreich, S A, 1998; *Automação do Corte de Materiais Flexíveis na Indústria do Vestuário*, V Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Fortaleza

Trajectory Generation in the Cut Automation of Flexible Material

Abstract: The Brazilian industry makes great use of flexible material, in the area of fabrics, plastics, paper and leather. Such material need to be processed quickly, with high precision and quality . In the case garment industry fabric is the principal material. This work addresses the algorithmic solution to problem of the automatic generation of the cut trajectory for a CNC machine prototype destined to the cut of flexible materials. In addition it addresses algorithms for extracting the trajectories from a mold drawing provided by CAD file. It was noticed that the algorithm initially adopted could be improved by optimizing the cut time in turn increasing the productivity. It is shown that the problem of generating a trajectory for an optimized plane in time is the same problem of generating eulerian circuits, which can be solved by analogy with the “Chinese postman” problem.

Key words: Automation, CAD/CAM, Trajectory generation