

Análise da temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta

O conhecimento do calor gerado na região de contato entre a peça e a ferramenta permite estabelecer uma relação entre o desgaste da ferramenta e as demais variáveis envolvidas no processo. Este trabalho propõe o monitoramento da temperatura utilizando um sistema de visão artificial composto por uma câmera de infravermelho, uma frame grabber e um computador. Ele completa o artigo do mesmo autor publicado na edição de fevereiro passado, como uma das condições para automatizar os processos de usinagem.

J. E. Borelli, C. A. de França, G. C. F. Medeiros e A. Gonzaga

O calor gerado na região de contato entre a peça e a ferramenta de corte é um parâmetro que permite medir o desempenho da ferramenta durante o processo de usinagem. A contínua necessidade de aumento das velocidades de corte em processos de usinagem de alto desempenho tem impulsionado pesquisas de novos materiais resistentes a altas temperaturas, assim como estudos da maximização da taxa de remoção de material^[6]. A medida da temperatura durante o corte é o fator mais importante na investigação do uso de ferramentas, pois permite controlar os fatores que influenciam no seu uso, vida e desgaste^[5]. A temperatura também influencia a precisão da máquina e a rugosidade superficial do acabamento^[2,8].

D'Errico^[6] propôs um sistema de controle adaptativo que funciona com retroalimentação em tempo real para monitoramento de temperaturas de corte em processos de torneamento. A temperatura de corte é estimada através da f.e.m. medida em um termopar que é inserido na ponta

da ferramenta. Lin *et al.*^[9] desenvolveram um sistema que utilizou um pirômetro para medir temperatura da ferramenta em altas velocidades de corte e validaram o modelo comparando com os resultados obtidos por Kato *et al.*^[7], que usaram o método dos pós metálicos. Casto *et al.*^[5] realizaram uma abordagem múltipla para avaliação das temperaturas em ferramentas de cerâmica usando pós metálicos de temperaturas de fusão constantes e relataram as dificuldades para a implementação do método. Ay *et al.*^[1] propuseram o uso de um conjunto de termopares extrafinos conectados na extremidade de corte da ferramenta.

Em 1997, Ay e Yang^[2] usaram um sistema termográfico, em sincronismo com um conjunto de termopares, para analisar as variáveis durante o processo de usinagem. O sistema forneceu informações em forma de termogramas, possibilitando a investigação da distribuição da temperatura nas ferramentas e como a transferência de calor pode afetar o uso, a vida e o desgaste da ferramenta. Em outra etapa, foi usado um microscópio eletrônico para investigação da superfície da ferramenta.

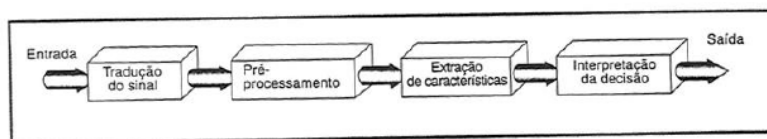


Fig. 1 – Diagrama de blocos de um sistema de visão artificial

João Eduardo Borelli, Celso Aparecido de França, Gilmar Caiado Fleury Medeiros e Adilson Gonzaga são do Laboratório de Visão Computacional do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de São Paulo, localizada em São Carlos (SP). Este artigo foi apresentado como palestra no Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (Conem 2000), realizado entre os dias 07 e 11 de agosto de 2000, na cidade de Natal (RN).

SYSNO 1193456
PROD 000908

ACERVO EESC

1193456
070901

O objetivo deste nosso trabalho é possibilitar a análise da temperatura gerada na região de contato peça-ferramenta durante as operações de torneamento de alto desempenho e verificar a sua influência no desgaste da ferramenta, para identificar as melhores características a serem usadas no reconhecimento de padrões de estados de usinagem ou de estados da ferramenta. Para isso, foi implementado um sistema composto de quatro módulos: aquisição da imagem, digitalização, pré-processamento e processamento. Uma câmera de infravermelho, uma *frame-grabber* e o *software* desenvolvido compõem o sistema usado neste trabalho, que apresenta uma nova metodologia para controle de usinagem. Na literatura especializada não se encontram trabalhos que relacionem reconhecimento de padrões e monitoramento de condições de usinagem através do uso de imagens de câmera de infravermelho.

Como é muito difícil imitar totalmente o sistema visual humano, um sistema de máquina foi projetado para tarefas específicas, tais como: reconhecimento de objetos, inspeção visual e controle de processos. A tarefa de visão da máquina pode ser dividida em quatro itens^[10]: tradução do sinal, pré-processamento, extração de características e interpretação (figura 1, pág. 114).

Na tradução dos sinais, os sensores são responsáveis pela transformação da energia luminosa em sinais elétricos e, a partir destes, uma cena digitalizada pode ser montada num *buffer* de memória. Como exemplo de sensores visuais existem as câmeras CCD, os fotodiodos e as câmeras de infravermelho, entre outros.

O pré-processamento melhora o sinal que vem do sensor, podendo ser implementado em *software* ou *hardware*. Os filtros utilizados para eliminar ruídos e os detectores de borda são exemplos de rotinas de pré-processamento.

A extração de características é a etapa na qual se obtém as características relevantes do objeto que melhor definam um modelo de entrada.

Na fase de interpretação tenta-se encontrar, em um banco de dados ou no banco de conhecimento, aquelas características que mais se aproximam das extraídas do objeto, para então compreender a cena e tomar uma decisão, seja classificar ou controlar um processo.

Desenvolvimento do sistema

O *software* e o *hardware* envolvidos em um sistema de medida e monitoramento de temperatura

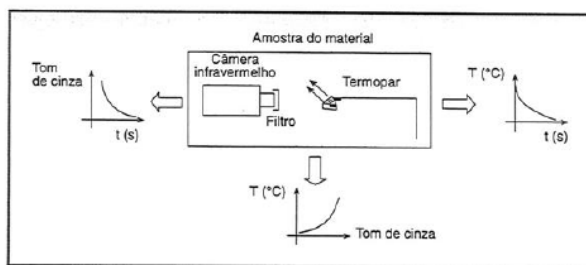


Fig. 2 – Calibração da câmera de infravermelho

ra devem possuir uma solução dedicada, com funções específicas e com um nível de automação necessário para cumprir os seguintes requisitos: fornecer uma interface amigável com o usuário, calcular automaticamente as temperaturas em diferentes regiões do sistema e para diferentes materiais, mostrar as imagens da usinagem, mostrar as isothermas e permitir a automação na extração das características.

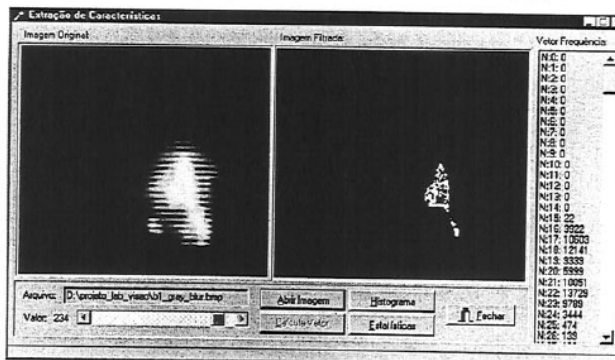
Para o monitoramento do desgaste da ferramenta em operação de torneamento de desbaste foram fixadas as condições de usinagem (item *hardware*) e escolhidos cinco padrões de ferramenta: nova, boa, média, gasta e ferramenta no fim da vida, de maneira análoga aos trabalhos de Ryabov *et al.*^[11] e de Ay e Yang^[2]. Em seguida, foram adquiridas as imagens e extraídas as características desses padrões.

O desenvolvimento do sistema está dividido em duas partes: *software* e *hardware*, detalhadas nos itens a seguir.

Hardware

Para a aquisição das imagens da usinagem foi usada uma câmera de infravermelho AGA Thermovision 720 adaptada a um sistema de acoplamento e a uma *frame grabber* (Mírovideo DC30

Fig. 3 – Interface para tomada de decisões. A imagem registra o momento da quebra da ferramenta com precisão de 1/60 segundos.



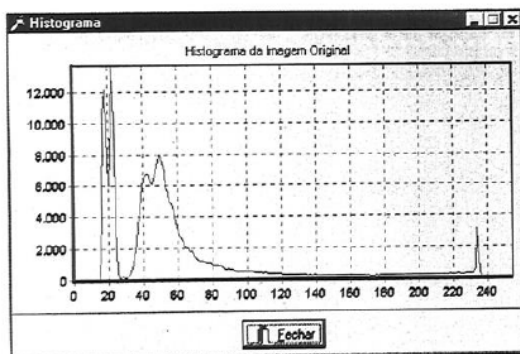


Fig. 4a - Histograma de uma imagem

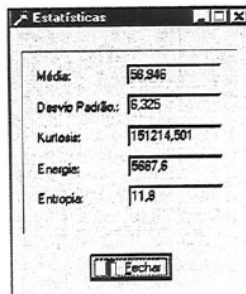


Fig. 4b - Características extraídas do histograma

Míro). O programa foi implementado em um microcomputador Pentium III, 450 Mhz, 128 Mb de RAM. Para a aquisição de dados foi usado o *software* Labview com *hardware* National Instruments.

A peça para o ensaio foi uma barra laminada de aço ABNT 1045 de 75 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. A ferramenta usada foi uma pastilha Sandvik WNMG 06 04 08-PM, P15 com porta ferramenta Sandvik MWLNL2525-06. Foi utilizado um torno Index modelo GU-600 com comando Siemens 810D, potência de 22 kW e rotação máxima de 5.000 rpm. Para a operação de torneamento, suboperação de torneamento de desbaste a seco foram utilizados: profundidades de corte de 0,20 mm e 0,40 mm; avanços de 0,07 mm/r, 0,25 mm/r e 0,50 mm/r e velocidades de corte de 295 m/min, 396 m/min e 497 m/min.

A câmera de infravermelho foi fixada a uma distância de 300 mm da ferramenta. Em seguida, foram estabelecidas as condições de usinagem. Foi também utilizado um filtro de densidade neutra para evitar a saturação da câmera.

Calibração da câmera de infravermelho

Para a medida da temperatura através da radiação infravermelho é necessário considerar parâmetros como a emissividade do objeto, a

distância do objeto até a câmera, umidade relativa, temperatura atmosférica e temperatura refletida pelo ambiente^[2] assim como características da superfície do objeto^[13].

Mantendo-se fixos os mesmos parâmetros em que se encontravam a câmera, a peça, a ferramenta e o cavaco durante a usinagem, aqueceu-se amostras de materiais retiradas imedia-

tamente após o processo de usinagem e traçou-se as suas respectivas curvas de temperatura de resfriamento em função do tempo. Para a medida da temperatura, foi usado um termopar conectado à amostra e ligado a um sistema de aquisição de dados. A câmera de infravermelho foi usada para captar as imagens do resfriamento das amostras. Tais imagens foram posteriormente digitalizadas e forneceram imagens em tons de cinza pelo mesmo tempo de resfriamento das amostras. Através do processamento quadro a quadro destas imagens, por intermédio de um programa desenvolvido, foi possível traçar as curvas de tons de cinza em função da temperatura para cada amostra. Eliminando-se a variável tempo, obteve-se como resultado os gráficos relacionando tons de cinza com as respectivas temperaturas. Estes gráficos foram usados para traçar a curvas de calibração da câmera para cada amostra. Para que a faixa de temperatura dos materiais durante o processo de usinagem não saturasse os tons de cinza das imagens capturadas pela câmera, foi usado um conjunto de filtros de densidade neutra inseridos na extremidade da objetiva da câmera de infravermelho durante as filmagens (figura 2, pág. 117). O número de filtros foi determinado experimentalmente.

Os dados da curva de calibração foram então usados para inicializar as variáveis do *software*, possibilitando ao usuário segmentar regiões de interesse, medir temperaturas e traçar isotermas da ferramenta, peça e cavaco, de maneira mais precisa.

O termopar foi inserido em um orifício de 0,20 mm, previamente feito por processo de eletroerosão na ponta da ferramenta de corte. O termopar, ao aquecer, gera uma tensão proporcional à temperatura.

Fig. 5 - Tom de cinza em função da velocidade de corte

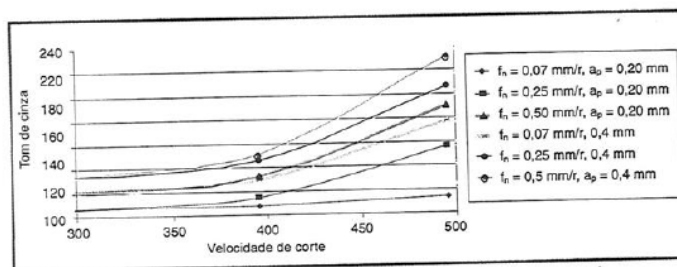
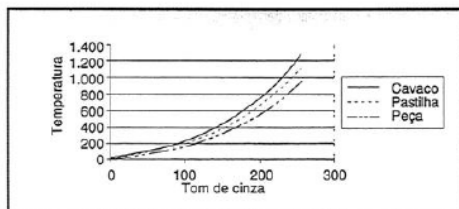


Fig. 6 – Calibração da câmera de infravermelho para diferentes materiais



Software

A interface para tomada de decisões foi desenvolvida em Delphi 4 (figura 3, pág. 117).

As funções do programa são direcionadas para cumprir os requisitos do sistema de monitoramento e análise da distribuição de calor durante o processo e também para definição dos padrões para o monitoramento.

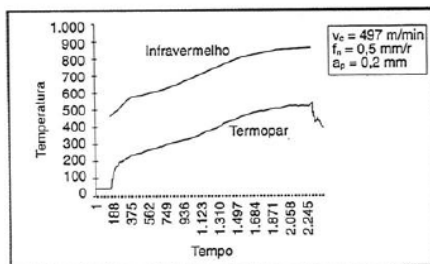
Do lado esquerdo do formulário principal da figura 3 aparece a janela que contém a imagem original da câmera de infravermelho já digitalizada. O lado direito mostra a imagem processada através de um filtro, segundo a especificação do usuário. O cursor "valor", abaixo e à esquerda, regula o tom de cinza desejado de 0 (preto) a 255 (branco), o que corresponde ao traçado de isoterma em torno do valor de temperatura e amplitude Δ previamente escolhidos. Os processamentos são realizados sobre o histograma da imagem. Um exemplo de histograma é mostrado na figura 4a (pág. 120). A figura 4b (pág. 120) mostra as características extraídas deste histograma.

Através da calibração da câmera de infravermelho é possível configurar o software com os valores de limiar (*threshold*) para faixas de tons de cinza correspondentes às temperaturas de interesse do usuário, assim como a escolha de níveis para as isotermas.

Resultados e conclusões

A luminosidade dos pixels ou tons de cinza apresentados nas imagens, como as da figura 3, são

Fig. 7 – Comparação da medida da temperatura fornecida pelo termopar no interior da ferramenta e temperatura no ponto de contato entre peça e ferramenta, obtida pela câmera de infravermelho



proporcionais à energia emitida pelo espectro infravermelho e, segundo a equação de Stefan-Boltzman, essa energia varia com a quarta potência da temperatura. De acordo com Ber[3,4] e Shaw[12] a temperatura varia com a velocidade de corte. Segundo a equação apresentada por D'Errico[6], a qualidade de acabamento, performance e vida da ferramenta variam com a temperatura. Pode-se, então, concluir que a luminosidade do pixel varia com a velocidade de corte e pode ser considerada como um importante parâmetro para verificar a performance, qualidade de acabamento e vida da ferramenta.

O gráfico da figura 5 (pág. 120) mostra a variação dos tons de cinza em função da velocidade de corte.

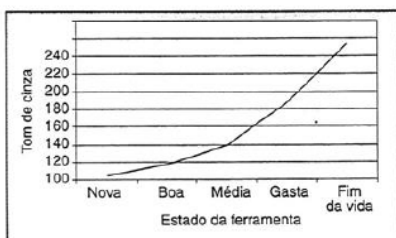
As temperaturas de usinagem aumentam com o aumento da velocidade de corte, mas também aumentam em proporções secundárias com o aumento do avanço e profundidade.

Os resultados da calibração da câmera de infravermelho são mostrados na figura 6. As diferentes curvas de calibração da câmera para os diferentes materiais (cavaco, inserto, peça) já eram esperadas, pois diferentes materiais possuem propriedades e atributos diferentes, conforme descrito em Ay e Yang[2] e Solomon[13].

A figura 7 mostra a comparação das medidas fornecidas pelo termopar e pelo sistema desenvolvido para uma determinada condição de usinagem. A diferença de níveis entre as duas curvas deve-se à natureza das medidas: o termopar mede a temperatura no interior da ferramenta e o software registra e converte a temperatura no ponto de contato peça-ferramenta. Além disso, devem ser considerados erros acumulados na calibração, resistência térmica na superfície de contato entre a ferramenta e o termopar[9], distância do termopar até a fonte de calor e erros do sistema de aquisição. As temperaturas no ponto de contato peça-ferramenta assemelham-se aos resultados obtidos por Ay e Yang[2] usando-se ferramentas novas. Muitos dos sinais captados pelo termopar foram descartados pois, além de serem instáveis, apresentavam vários tipos de ruídos. Os resultados mostrados na figura 7 para a propagação do calor no interior do material da ferramenta estão de acordo com os resultados apresentados por Ay e Yang[2] para a propagação do calor e aumento da temperatura no interior do material da peça.

Foram extraídas as seguintes características das imagens para cada padrão de ferramenta

Fig. 8a – Tons de cinza em função do desgaste da ferramenta a 497 m/min



(nova, boa, média, gasta, fim de vida): média, variância, curtose, energia, desvio padrão, entropia. Através destas medidas, é possível montar um vetor de características para controlar o processo de usinagem. O bom desempenho de um sistema de reconhecimento de padrões depende da escolha adequada de características discriminantes. A figura 8a mostra que a luminosidade dos pixels (temperatura) aumenta com o desgaste da ferramenta, e com base nestes dados é feita a avaliação da característica de média apresentada na figura 8b. A comparação da distribuição normal de cada uma das características para cada estado padrão da ferramenta

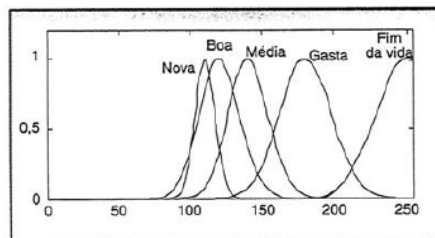


Fig. 8b – Distribuição normal da característica média para cada estado da ferramenta

é usado como método de avaliação dessas características e suas curvas devem estar o mais distante possível umas das outras. Para a característica de média, as curvas são discriminantes para os padrões de ferramentas no final da vida e de ferramentas gastas em relação às demais, mas não são discriminantes para os padrões de ferramentas novas, boas e médias entre si. Para separar estes três padrões foram escolhidas outras características como: variância, curtose, energia, desvio padrão, entropia. Estas características foram suficientes para montar o vetor de carac-

terísticas e para uma correta classificação das imagens e dos estados de ferramenta, como proposto inicialmente.

A eficácia do sistema de medidas proposto está vinculada à eficiência de cada etapa isolada do sistema, desde a aquisição de imagens até o processamento, incluindo calibrações e aquisição de dados, entre outros aspectos.

Segundo embasamento teórico e resultados obtidos neste artigo, o monitoramento da temperatura é condição necessária para o gerenciamento das condições de usinagem e este gerenciamento é de fundamental importância para automação. Com a apresentação desta nova metodologia, mostrou-se que os sistemas de visão artificial podem ser vistos como condição necessária para o monitoramento eficaz da temperatura, representando uma condição necessária para a automação do processo de usinagem.

Bibliografia

- 1] Ay, H.; Yang, W.; Wang, J. A.: - Dynamics of cutting tool temperatures during cutting process. *Experimental Heat Transfer*, 7(3), 1994.
- 2] Ay, H.; Yang, W.: - Heat transfer and life of metal cutting tool in turning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Great Britain, Elsevier Science Ltd., vol. 41, nº 3, p. 613-623, 1997.
- 3] Ber, A.: - Relationship between thermal properties and flank wear of cemented carbide tools. *CIRP Annals*, vol. 21-1, p. 21-22, 1972.
- 4] Ber, A.: - The effect of abrasion and thermal properties of cemented carbide cutting tool grade on the flank wear characteristics. *ASME Transaction Journal of Engineering for Industry*, vol. 956, august, p. 794-79, 1973.
- 5] Casto, S. L.; Valvo, E. L.; Piacentini, M.; Ruisi, V. F.: - Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experimental texts, numerical analysis and SEM observation. *CIRP Annals, Manufacturing Technology*, Hellweg Publishers Ltd, Switzerland, 1994.
- 6] D'Errico, G. E.: - An adaptive system for turning process control based on tool temperature feedback. *Journal of Materials Processing Technology*, 78, 1998, p. 43-47.
- 7] Kato, S.; Yamaguchi, K.; Hiraiwa, Y.: - Measurement of temperature distribution within tool using polders of constant melting point. *ASME Journal of engineering for industry*, may, p. 123-128, 1980.
- 8] Klocke, F.; Eisenblätter, G.: - Dry cutting: keynote papers presented at the opening session. *CIRP Annals, Manufacturing technology*, Hallway Publishers Ltd., Switzerland, 1997.
- 9] Lin, J.; Chen, T. C.; Wang, C. I.: - Development of infrared pyrometer with fiber optic for measuring cutting temperature at high speed cutting. *ASME, PED, Monitoring and control for manufacturing process*, vol. 44, p. 17-32, 1990.
- 10] Nitzan, D.: - Three-dimensional vision structure for robot applications. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 10, nº 3, may, p. 291-309, 1988.
- 11] Ryabov, O.: - An in-process direct monitoring method for milling tool feature using laser sensor. *Annals of CIRP, Technical Report*, Japan, 1996.
- 12] Shaw, M. C.: - Metal cutting principles. Oxford Science Publications Clarendon Press Oxford, p. 274-275, 1984.
- 13] Solomon, S.: - Sensors handbook. McGraw-Hill, ISBN: 0-07-059630-1, USA, 1998.