

切削工程의 適應制御에 關한 研究

송지복* · 이만형* · 이시복* · 김선호**

A Study on the Adaptive Control in Machining Process

Ji-Bok Song, Man-Hyung Lee, Si-Bok Lee and Sun-Ho Kim

ABSTRACT

Adaptive control technique for a milling process is developed and implemented in an NC milling machine retrofitted to enable the micro-computer control.

The control algorithm has the objects to guarantee the optimal tool life which can give the predetermined allowable lower limit of surface roughness.

The experimental results show

1) that the extended tool life equation has good reliability in normal tool wear conditions.

2) and that the proposed adaptive control technique, which determine the optimal cutting condition by basing on the tool life equation modified continually according to the tool wear measured in real time, performs well.

1. 緒 言

1960年代初 適應制御技法이 처음 工作機械에 적용되기 시작해서 初期에는 Taylor의 工具壽命方程式을 컴퓨터에 저장시켜 절삭공정의 경제성을 고려하는 研究¹⁻³⁾와 절삭공정에 있어서 미리 安定領域을 찾아 이 조건을 컴퓨터 내의 구속조건으로 이용하는 研究⁴⁻⁵⁾ 등이 이루어져 왔으나, 최근에 이르러서는 절삭기구에 대한 이론적 접근을 바탕으로 절삭공정의 수학적 모형화를 통해 절삭 매개

변수의 동정 (Identification)을 수행, 最適適應制御 (ACO)⁶⁾를 하거나 일정 절삭력을 유지하기 위해 기준모델추종적응제어 (Modference)⁶⁻⁸⁾ 또는 가변이득제어방법을 통한 구속적응제어 (ACC)⁴⁻⁵⁾, 가공물의 형상오차를 줄이기 위한 형상적응제어 (GAC) 등에 대한 研究가 이루어지고 있다. 이러한 AC技法은 센서의 信賴性和 正確性, 컴퓨터의 計算能力, 그리고 切削機構에 대한 理論的, 實驗的 理解 程度에 依存하기 때문에 實用化⁹⁻¹⁵⁾에 時間이 걸리고 있다.

本 研究에서는 밀링을 對象으로 하여 미리 設定

* 釜山大 工大

** 釜山大 大學院

한 가공면 거칠기를 유지하는 상한공구마모(W_{opt})를 實驗的으로 구하고 이 마모량 도달 時間을 最適 工具壽命(T_{opt})으로 잡아 이를 追從하는 切削을 수행하기 위해 切削中(In-Process)⁹⁻²³⁾ 切削力으로부터 豫測한 공구마모와 절삭조건에 따라 工具壽命의 變化가 반영된 확장된 工具壽命方程式으로부터 구한 마모를 비교, 가공조건을 수정하는 적응제어방법을 다루었다.

제안된 方法은 기존 NC 工作機械에도 마이크로 컴퓨터를 利用, 리트로피트(Retrofit)해서 設置 運用이 可能한 利點을 가지고 있다.

2. 基本 制御方程式

2-1. 予備實驗

2.1.1 實驗裝置 및 方法

使用機械: 회전기계제작 WHV-1100

被 削 材: S45C

使用工具: End-mill SKH 56 (SANKYO JAPAN)

Cutter 徑: 10 mm, 날수: 2,
비틀림角: 30, Radial角: 10,
前切刃角: 3, 前여유角: 6,
橫여유角: 5(deg.)

切削條件: 직선전절삭

切削速度: 20~38 m/min

移送速度: 60~120 mm/min

切 削 幅: 5 mm, 切削깊이: 1 mm

工具의 마모는 End-mill의 마모 特性을 가장 잘 나타낼 수 있는 Margin 마모를 對象으로 하였으며 測定의 個人的 誤差를 피하기 위해 最大 마모와 最小 마모를 취하여 산술평균하였다. 또한 切削抵抗은 Table 위에 設置한 動力計(三保電氣, 日 AST-HH-5427)의 Strain을 통해 가장 예민하게 반응을 일으키는 가공방향의 主分力만을 測定하였다.

2.1.2 工具磨耗와 切削抵抗의 舉動

Fig 1은 30분 切削에 따른 工具磨耗 현상을 각각의 切削條件에 따라 明示한 것으로 移送速度가 90 mm/min를 초과하였을 때 異常磨耗(심한 磨耗現象, Chipping, 缺損등)가 일어나고 있었으며 이를 AC System에 使用할 切削條件을 設定하는데 主要한 資料로 삼았다.

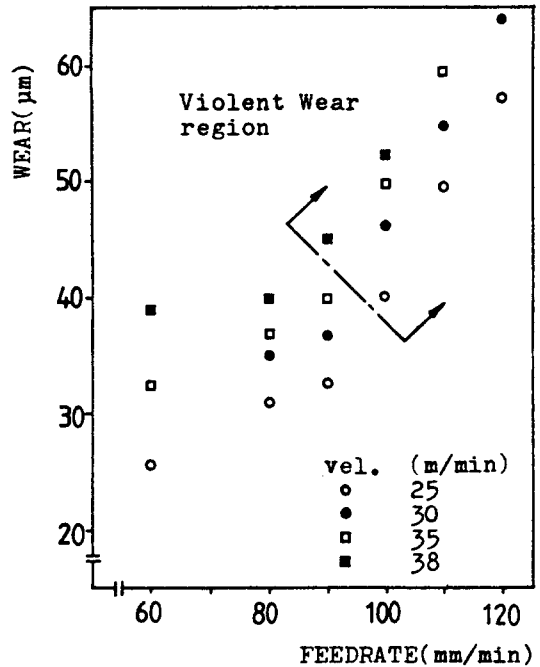


Fig. 1. Tool Wear for cutting conditions

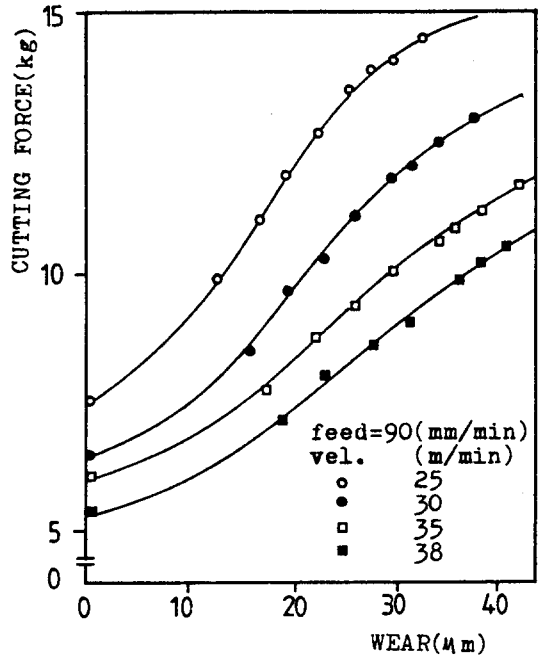


Fig. 2. The relation between cutting force and tool wear

한편 이송속도를 90 mm/min로 固定, 切削速度를 變化시키면서 磨耗와 切削力과의 相關關係를 整

리한 것이 Fig. 2이다. 磨耗의 크기가 增加하면 그에 대한 切削抵抗은 단조 增加하고 있으며 磨耗에 대한 切削力의 영향은 저속에서 크고 고속이 되면 그 增加幅이 감소하고 있음을 알 수 있다.

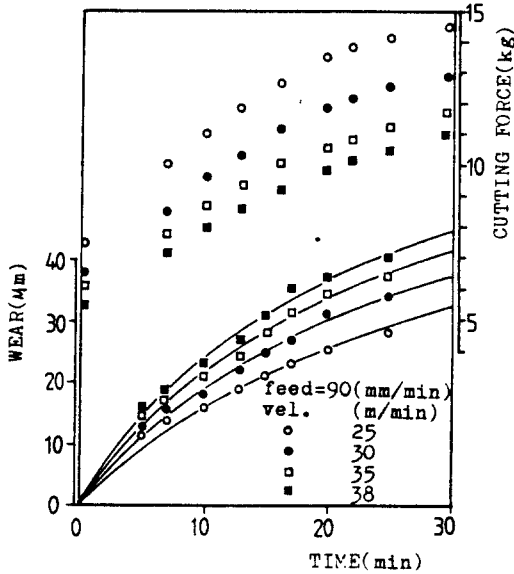


Fig. 3. The relation between tool wear and cutting force for time

Fig. 3은 以上の 實驗結果를 時間에 대한 磨耗와 抵抗關係를 나타낸 것으로 이 資料를 行列로써 行에 切削速度, 列에 切削抵抗으로 하여 Computer에 저장시킴으로써 切削抵抗과 切削速度가 주어지면 종래의 研究에서 必要했던 탐색시간을 줄여 時間遲延이 없이 磨耗의 크기를 구할 수 있다.

2 - 2. 擴張된 工具壽命方程式

2.2.1 MODEL 式의 設定

Taylor의 工具壽命方程式은 切削速度를 V, 壽命時間을 T라 하였을 때 $VT^n = C$ 로 표시되며 右變의 상수 C가 壽命判定基準磨耗 W와 이송속도 f 등의 切削條件에 따라 變하고 있는데 注目하여 이를 加味한 工具壽命方程式은 다음과 같이 擴張設定하였다.

$$Vf^l T^m W^n = c \quad \dots \quad (1)$$

따라서 式(1)로부터 임의의 上限磨耗에 대해 切削 Parameter V와 f가 정해짐으로써 工具壽命時間 T를 얻을 수 있다.

2.2.2 實驗的 檢討

Model 式(1)의 양변에 代數를 취하면 1次方程式이 된다. 즉,

$$\ln V + l \ln f + m \ln T + n \ln W = \ln c \quad \dots \quad (2)$$

여기서 계수 l, m, n 및 c를 구하기 위한 豫備實驗에서 얻은 20개의 資料 (Fig. 1 참조)에 대해 多重線形回歸分析을 행하면

$$l = 3.24, \quad m = 1.08 \cdot 10^{-3}$$

$$n = -3.76 \cdot 10^{-3}, \quad c = e^{-3.76 \cdot 10^{-3}}$$

이 되므로 式(1)은 다음과 같이 된다.

$$V f^{3.24} T^{1.08 \cdot 10^{-3}} W^{-8.776 \cdot 10^{-2}} = e^{-3.76 \cdot 10^{-3}} \quad \dots \quad (3)$$

이러한 형태의 工具壽命方程式은 본 實驗의 結果 (異常磨耗部分까지 包含)를 잘 表現할 수 있으나 Fig 1에서 100 mm/min 以上の 이송영역에서는 Chipping과 함께 磨耗가 急激히 進行되므로 AC System 구성상 이송속도를 90 mm/min으로 제한하지 않으면 안된다. 따라서 이러한 條件 (정상마모인 경우)下에서 工具壽命方程式은

$$VT^{0.692} W^{-1.1636} = e^{9.5815} \quad \dots \quad (4)$$

$$W = e^{-8.032} V^{0.8} T^{0.5954} \quad \dots \quad (5)$$

과 같이 되며 이를 AC System의 基本制御方程式으로 삼았다.

3. 適應制御技法

3 - 1. AC System의 構成

일반적으로 알려져 있는 擴張된 Taylor 工具壽命方程式은 일정한 壽命判定規準이 주어졌을 때 切削速度, 工具磨耗, 工具壽命등의 關係를 잘 나타낼 수 있으나 材料의 不均一性和 불의의 사태에 따른 工具의 異常磨耗에 대한 대책이 없기 때문에 본 研究에서는 切削工程中 切削抵抗을 매개로 하여 測定된 工具磨耗와 工具壽命方程式⁵⁾에서 구한 工具磨耗와 비교해 가면서 切削條件을 수정 制御하기 위한 AC System을 Fig. 4와 같이 構成하였으

며 이를 수행할 實驗裝置가 Fig. 5이다.

Fig 4에서 Tape Reader와 Control Unit는 AC System으로 改造하기 전의 NC System이다. 이 System은 주축속도의 變化가 不可能하므로 AC System에서는 DC Motor (鳳明 DB025-001 7.5 HP)로 교체하였으며 여기에 Tacho-generator를 설치하여 Analog 信號를 A/D Converter를 거쳐 Computer에 전송하도록 하고 또한 공구 동력계로부터 얻은 切削抵抗을 Low-pass Filter를 거쳐 Strain Amplifier에서 1次 增幅하여 다시 OP-Amp에서 0~5V까지 增幅시켰다. 이 增幅된 信號를 直線化하기 위해(切削力의 Pulse를 평균값으로 하기 위해) RMS Voltmeter를 통과시킨 다음 A/D Converter(8bit)를 거쳐 Computer에 전송하였다. 이와같이 전

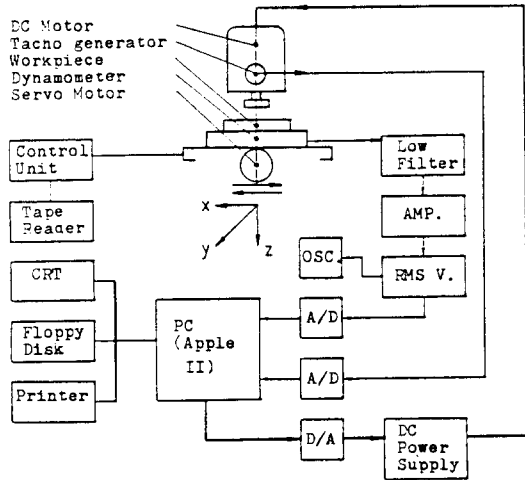
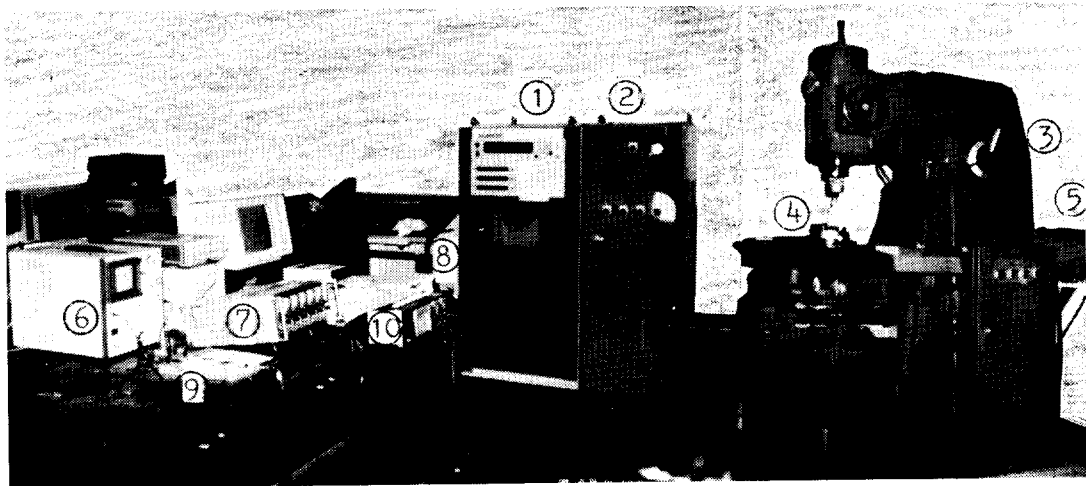


Fig. 4. Schematic diagram of equipment



- | | | | |
|---|---------------------------|----|--------------------|
| 1 | Tape Reader, Control Unit | 6 | Oscilloscope |
| 2 | DC Power Supply | 7 | Amplifier |
| 3 | Milling | 8 | A/D, D/A Converter |
| 4 | Tool Dynamometer | 9 | RMS Voltmeter |
| 5 | DC Motor, Tacho Generator | 10 | Computer Set |

Fig. 5. Experimental equipment

송된 情報를 利用하여 Computer에서는 상대방정식에서 구한 磨耗와 In-process로 檢出한 磨耗를 比較하여 새로운 切削條件을 D/A Converter와 DC Power Supply를 거쳐 DC Motor로 전송하도록 하였다.

3 - 2. 制御 SIMULATION

Fig. 6은 임의 Sampling Time에 대한 상태

方程式의 수정 기법¹⁹⁾을 표시한 것이다. 그림에서 실선은 가장 이상적인 工具磨耗의 進前을 나타낸 선으로 O점(初期條件, $T=0, W=0$)에서 切削을 개시하여 E점(終단조건, $T=T_{opt}, W=W_{opt}$)에서 作業이 종료되게끔 制御를 行한다고 하면 初期切削速度 V_0 는 다음 Sampling을 할 때까지 一定하여야 하기 때문에 $VT^m W^n = C$ 로부터

$$V_0 = (C / (T_{opt}^m W_{opt}^n)) \dots\dots\dots (6)$$

이 된다.

本研究에서는 W_{opt} 를 $40 \mu m$ 으로 T_{opt} 를 30 분으로 하였다. 이는 豫備實驗 過程에서 工具磨耗가 $40 \mu m$ 가 되었을때 가공면의 평균거칠기가 $15 \mu m$ 였으므로 가공면의 精度가 $15 \mu m$ 되었을 때를 工具의 最適壽命으로 하기 위해서다.

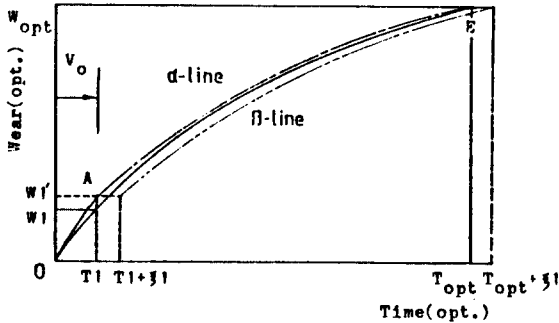


Fig. 6. The revised method of cutting conditions by computer algorithm

Fig. 6에서 맨 먼저 Sampling시 ($T = T_1$) 이상적인 磨耗의 크기가 W_1 인데 비해 切削抵抗을 매개로 하여 測定한 磨耗가 W_1' 였다면 A점에서 E점을 향하게끔 切削條件을 變更하지 않으면 안된다. 또한 이에 따른 工具壽命方程式도 現在의 切削過程에 맞추어 $VT^pW^q = C'$ 로 수정하여야 한다. 이때 지수인 p, q를 수정한다는 것은 상당한 어려움이 있으므로 C' 를 C_1 으로 수정하여 지수변동을 C_1 에 包含시키는 것이 經濟的일 것이다 (여기서 C_1 은 T_1 의 條件을 利用해

$V_0 T_1^m W_1^n = C_1$ 로 구해진다). 따라서 수정 상태방정식은

$$VT^m W^n = C_1 \dots\dots\dots (7)$$

이 되며 이 式을 利用하면 A점에서 E점으로 향하는 最適切削速度 V를 定할 수 있다.

지금 A점에서 E점으로 향하는 曲線 α와 平行的 曲線 β가 T_1 보다 ξ_1 만큼 떨어져 존재한다면

$$V_1 (T_1 + \xi_1)^m W_1'^n = C_1 \dots\dots\dots (8)$$

$$V_1 (T_{opt} + \xi_1)^m W_{opt}^n = C_1 \dots\dots\dots (9)$$

이 成立한다. 이들 두식으로부터 ξ_1 를 소거한다면 Sampling Time T_1 다음의 最適切削條件 V_1 을 구할 수 있다. 즉,

$$V_1 = ((W_{opt}^{-n/m} - W_1'^{-n/m}) / (T_{opt} - T_1)^m C_1) \dots\dots\dots (10)$$

이와같은 過程을 매 Sampling 할 때마다 수행함으로써 目標點 E로 향할 수 있으며 이에 따른 Simulation의 Flow Chart가 Fig 7이다.

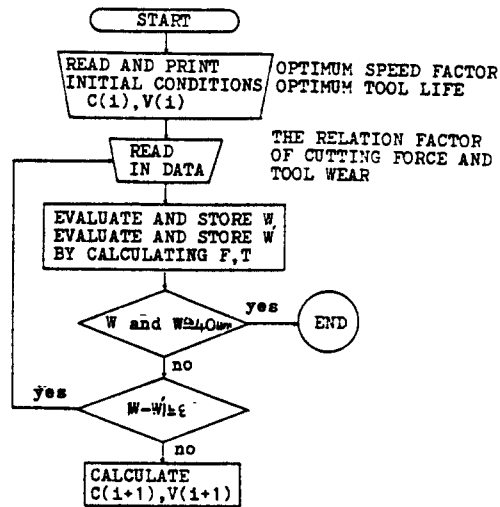


Fig. 7. Flow chart of adaptive control algorithm

3 - 3. 適応制御技法의 結果 및 考察

확장된 工具壽命方程式에서 측출한 磨耗 W와 切削抵抗으로부터 豫測한 工具磨耗 W'를 서로 比較해 가면서 豫備實驗과 같은 條件으로 適應制御實驗을 實施한 結果의 한 例가 Fig. 8이다.

그림에서 Sampling Time을 3분으로 $W' - W = \epsilon$ 의 값을 $2.5 \mu m$ 으로 하였을 때가 a)이며 b)와 c)는 그 값이 각각 $1.5 \mu m$ 과 $1 \mu m$ 인 境遇이다.

이때 In-Process에 의한 T에서의 磨耗 檢出은 Fig. 3의 자료를 Computer에 저장시킨 행렬을 利用하였으며 그 結果 시간을 要하는 수행과정 없이 (종래 適應制御技法에서의 磨耗量을 구하기 위한 探索, 計算時間이 제외되기 때문) 切削速度 V와 切削抵抗 F로부터 W'가 구해지기 때문에 기존 연구에서와 같은 대형 Computer를 使用하지

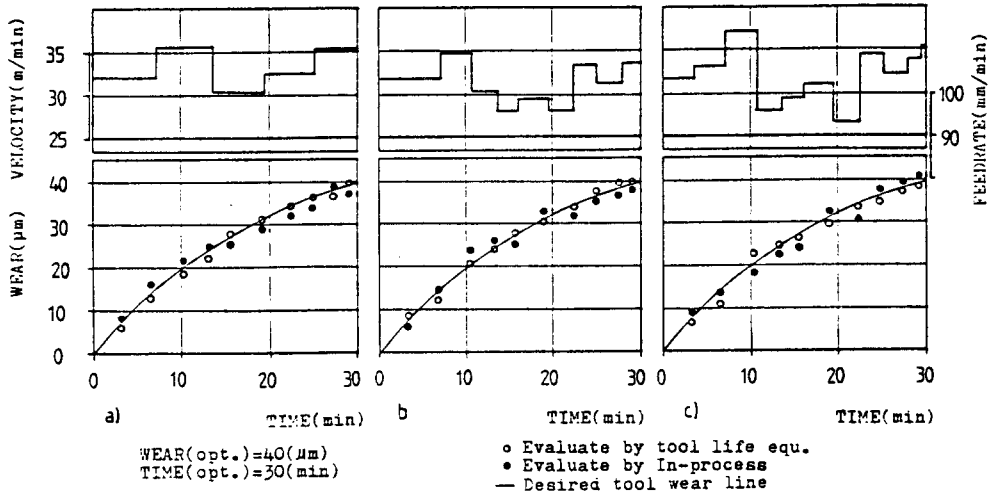


Fig. 8. One of example of output by Adaptive control a

않고 PC를 利用함으로써 System이 단순화되고, 또한 매 Sampling 할 때마다 切削條件을 수정하면서 30분 切削加工하였을 때의 工具磨耗의 크기를 測定한 結果 초기값으로 Computer Program에 入力시킨 $40\ \mu\text{m}$ 에 $2\ \mu\text{m}$ 이내의 誤差가 각각의 경우에 발생하였다. 이는 5% 정도의 誤差幅을 가진 것으로 適應制御技法의 再現성이 높음을 立證해 주고 있다.

4. 結 論

工具의 最適壽命時間과 限界加工面을 유지하기 위하여 기존 NC milling machine을 AC System으로 改造, Milling 工程의 適應制御를 實施한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 切削工程中 End-mill의 Margin 磨耗를 切削抵抗으로부터 推定이 可能하였으며 擴張設定된 壽命方程式은 정상마모의 범위에서 再現성이 높았다.

2) 工具磨耗를 On-Line으로 推定, 이로부터 狀態方程式의 常數를 적극적으로 변경하여 最適切削條件을 算出하는 適應制御方式의 實行이 可能하였다.

3) 본 System의 Software로 사용한 Algorithm의 새로운 開發과 함께, 새로운 Sensor를 利用함으로써 AC System의 信賴성이 增加하고 있음을 立證하였다.

謝 辭

本 研究는 韓國學術振興財團의 研究助成金으로 이루어졌기에 이에 심심한 사의를 표합니다.

REFERENCES

1. Landau, Y.D.: Adaptive Control: "The model reference approach, Marcel Dekker", New York, 1979.
2. Yoram Koren: "Computer Control of Manufacturing Systems", McGraw-Hill Book Company, pp.193-220, 1983.
3. D.W. Yen, P.K. Wright: "Adaptive Control in Machining—A New Approach based on the Physical Constraints of Tool Wear Mechanisms," ASME J. of Eng. for Industry, Vol.105, pp.31-38, 1983.
4. Jaeschke, J.R., Zimmerly, R.D., and Wu, S.M.: Automatic Cutting Tool Temp. Control, Int. J. of MTD, Vol. 7, No.4, Dec., pp.465-475, 1967.
5. D.A. Milner: "Adaptive Control of

- Feedrate in the Milling Process," Int. J. of MDR, Vol.14, pp.187-197, 1974.
6. A. Galip Ulsoy:"Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools," ASME J. of Dynamic System, Measurement, and Control, Vol.105-pp.107-112, Jun, 1983.
 7. T. Watanabe:"A Model-Based Approach to Adaptive Control Optimization in Milling," Proc. of ASME Winter Annual Meeting pp.27-46, 1983.
 8. M. Tomizuka, J.H. Oh, D.A. Dornfeld:"Model Reference Adaptive Control of the Milling Process," Proc. of ASME Winter Annual Meeting, pp.55-63, 1983.
 9. Sata, T and Kobagaski, M:"In-Process Measurement for Adaptive Control of Machine Tools, J. of Precision Machinery," Vol.38, No.10, pp.6-13, 1974.
 10. G.F. Mickleletti, W. Koenig, H.R. Victor:"In-Process Tool Wear Sensor for Cutting Operation," Annals of the CIRP, Vol.25/2, pp.483-495, 1976.
 11. J. Tlusty:"A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining," Annals of the CIRP, Vol.32/2, pp.563-572, 1983.
 12. Kunice Uehara:"Automatic Tool Wear Monitoring in NC Turning," Annals of the CIRP, Vol.28/1, pp.39-42, 1979.
 13. Y. Ihezaki, Y. Takeuchi:"Cutting Force Measurement of a Rotating Tool by means of Optical Data Transmission," Annals of the CIRP, Vol.33/1, pp.61-64, 1984.
 14. F. Giustic, M. Sautochi:"A Flexible Tool Wear Sensor for NC Lathe," Annals of the CIRP, Vol.33/1, pp.229-232, 1984.
 15. J. Hoh:"A Study on the Adaptive Control System for Turning Process," Doctorial Thesis Report, KAIS, 1980.
 16. M.C. Shaw:"Metal Cutting Principles," Clarendon Press, 1984.
 17. 村田浪司 外 2名, "高信頼性切削工具系に関する研究", 機械技術研究所報告, 第 131 號 (1983. 3).
 18. 岩田一明, "切削工具損耗のインプロセス測定", 日機學會誌 82-731, pp.1120~1129, 1979.
 19. 竹山秀彦 外 3名, "ソライス削りの適應制御に関する研究" 日機論, 40-340, pp.3533~3541, 1974.
 20. 渡辺敏昭 外 3名, "工作機械の適應制御に関する研究", 日機論, 43-375, pp.4307~4314, 1977.
 21. 堅村幸辰, "工作機械の適應制御に関する研究", 日機論, 48-432, pp.1284~1292, 1982.
 22. 頼光哲 外 2名, "切削抵抗の動的成分に関する研究", 精密機械, 49-5, pp.642~648, 1983.
 23. 頼光哲 外 3名, "切削抵抗の動的成分による工具磨耗の検出", 精密機械, 50-7, pp.1117~1122, 1984.