



應用強健性進給率控制於高效率加工

Application of Robust Feedrate Control to Highly Efficient Machining

¹ 蔡孟勳 / ² 黃泓緯 / ³ 麥朝創

¹ 國立中正大學 機械工程學系 專任教授兼工具機中心主任

² 國立中正大學 機械工程學系 博士生

³ 工研院智慧機械科技中心 智慧機械技術組 數值控制部 經理

摘要：本文利用量化回授控制理論(quantitatively feedback theory, QFT)設計一強健控制器，並應用於適應性切削進給速度控制。所提出的演算法可以根據主軸電流動態地改變進給速度。利用 QFT 所設計的控制器即使在不同的切削條件下也能保持固定的切削力大小，進而提高加工效率。本文除了進行數值模擬外，也透過實際切削實驗驗證此強健性進給速度控制法則之性能。

Abstract : The quantitative feedback theory (QFT) to design a robust controller for adaptive cutting feedrate control is presented in this paper. The proposed algorithm could dynamically change the feedrate according to the spindle current which is highly related to the measured cutting force. The QFT controller could provide the constant cutting force even under different cutting conditions. Hence, the machining efficiency could be improved under the robust control. Besides numerical simulations, real cutting experiments were conducted to validate the performance of the proposed robust cutting feedrate control algorithm (RFC).

關鍵詞：強健控制、進給率控制、量化迴授理論

Keywords : Robust Control, Feedrate Control, Quantitatively Feedback Theory

前言

一般來說，由 CAD/CAM 軟體所產生的加工程式通常在加工過程中皆給定固定的進給率，並未根據不同的切削條件與主軸負載狀況進行變化。然而隨著切削深度的增加，若仍使用固定進給速度可能會導致主軸過載，可能會進一步損壞刀具或降低刀具壽命。另一方面，當切削深度減小時，若仍使用固定的進給率，則主軸使用效率不高。過去 2~30 年以來，陸續有學者對適應性進給率控制進行研究，

為了實現適應性切削控制，在[1, 2]中提出計算加工過程中的切削力的方法。Altintas [3, 4]提出了適應性進給速度控制，利用適應性演算法來克服切削過程中的動態變化。然而，適應性策略的參數收斂速度可能會使暫態響應時間較長。另一種方法是應用模糊控制理論進行適應性切削力控制[5]，然而模糊控制所需要切削相關資料庫並不容易開發。其他進給率控制方式如結合線上量測系統並透過基因演算法(genetic algorithm, GA)進行控制[6, 7]。雖然文獻顯示了適應性切削方法的可行性，但實際上的切



削行為可能更為複雜，因此適應性進給率控制器應該在各種切削條件下仍保有強健性，以確保切削過程的穩定性。因此在本文中，提出了使用量化回授控制理論(quantitative feedback theory, QFT)進行強健控制器設計，以確保即使在各種切削條件下也能應用該適應性控制演算法。首先針對不同切削條件的切削行為進行系統參數的鑑別，並考慮訊號量測時所產生的延遲時間作為整體的系統不確定性進行控制器設計。最後透過模擬與實驗驗證所開發之具強健性之進給率控制器之性能。

進給率控制系統模型建立

強健性進給率控制系統方塊圖如圖 1 所示，加工程式經由上位控制器進行解譯與插補後所產生之速度命令經由伺服馬達速度迴路驅動馬達進行切削加工。而切削過程中的切削力受進給速度與其他切削條件：如切深、主軸轉速等影響而產生變化。當切削條件改變時，強健性控制器對速度命令進行

調整而使切削力維持在所給定的參考負載值。因此在設計具強健性之進給率控制器之前，首先我們先針對伺服馬達之速度迴路以及銑削模型進行推導。

一般速度迴路的方塊圖如圖 2 所示，其包含一個 PI 控制器，一階低通濾波器，以及馬達剛體模型。其中 K_p 為速度迴路之比例控制器， K_i 為速度迴路的積分器， a 代表低通濾波器之頻寬， K_t 為馬達扭矩常數， J 與 B 分別為馬達慣量與黏滯摩擦係數。其速度閉迴路轉移函數如方程式(1)中所示。

$$G_c(s) = \frac{V_{out}}{V_{cmd}} = \frac{aK_pK_t s + aK_tK_i}{Js^3 + (aJ + B)s^2 + (aB + aK_pK_t)s + aK_tK_i} \quad (1)$$

在得到速度迴路轉移函數之後，再來將針對切削模型進行推導。一般而言，切削力可以表示成切削係數乘上切屑面積，如方程式(2)所表示。

$$F = K_s A = K_s b h_m(i) \quad (2)$$

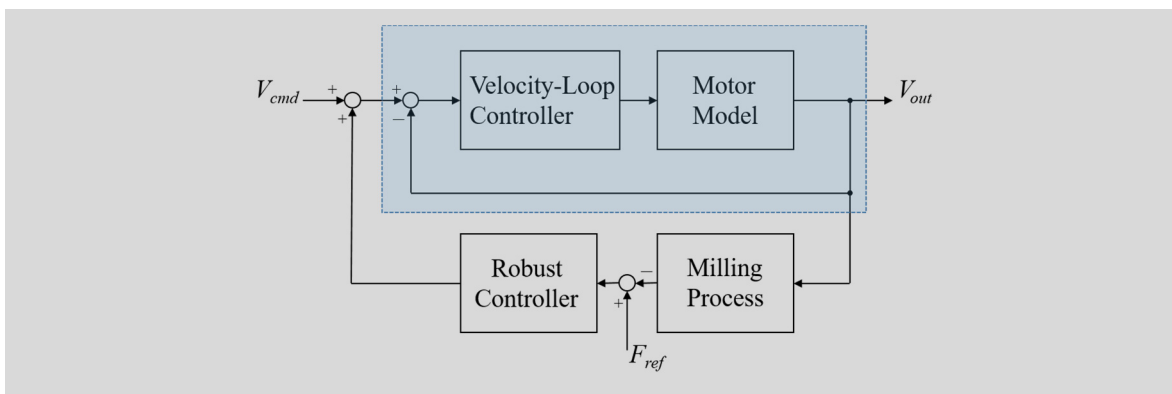


圖 1 強健性進給率控制方塊圖

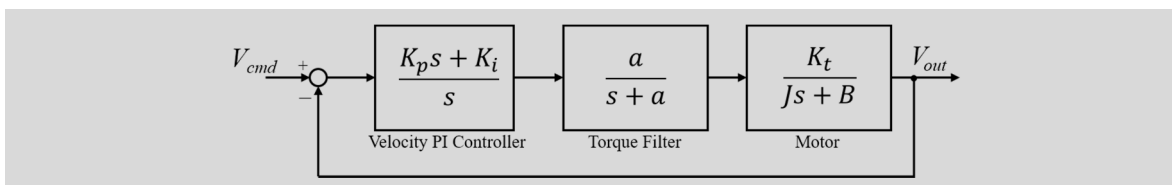


圖 2 速度迴路方塊圖



其中 K_s 為切削係數、 b 為軸向切深、 h_m 為切削厚度，而切削厚度 h_m 又可表示成每刃進給量 f_i 與刀具旋轉角度 ϕ 的函數：

$$h_m = f_i(i-1)\sin(\phi_{i-1}) \quad (3)$$

每刃進給量可以從進給率、主軸轉速、刀具刃數之關係計算得到：

$$f_i = \frac{V}{\Omega N_t} \quad (4)$$

受刀具與工件剛性的影響，在加工時刀具會產生微小的變形，如圖 3 中所示。其產生的變形量如方程式(5)中所描述，因此方程式(3)的切屑厚度可以修改成方程式(6)。

$$\Delta n(i) = \frac{F}{K_{tool}} \quad (5)$$

$$h_m = f_i(i-1)\sin(\phi_{i-1}) - \Delta n(i) + \Delta n(i-1) \quad (6)$$

從圖 1 的方塊圖中可知欲推導之切削模型為切削力與進給速度之間的關係式，因此將方程式(2)到方程式(6)整理後可得到：

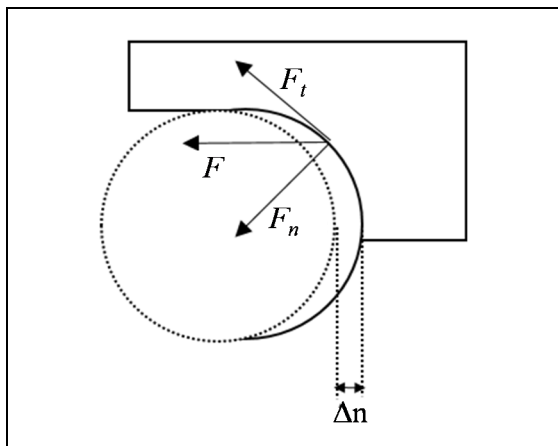


圖 3 刀具剛性造成之切屑厚度變化

$$G_c(z) = \frac{F}{V}(z) = \frac{K_s K_{tool} b \sin(\phi)}{\Omega N_t (K_s b + K_{tool})} z^{-1} = \frac{\beta z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}} \quad (7)$$

系統參數鑑別與系統不確定性建立

根據方程式(7)所推導的切削模型可知，其轉移函數特性與切削係數 K_s 、 K_{tool} 以及其他切削條件如切削深度等相關，換句話說當切削條件產生變化時，其特性亦會隨之改變。因此為了驗證速度迴路與切削模型之正確性並進一步對其參數進行鑑別，我們進行了許多切削實驗，其架構如圖 4 所示為搭載 FANUC 控制器之三軸工具機，實驗中除透過 FANUC 所提供之伺服調機軟體(servo guide)紀錄伺服資料外，並使用 Kistler(奇石樂)之切削動力計作為切削力之量測儀器。

首先針對 X 軸及 Y 軸的速度迴路進行參數鑑別，透過系統鑑別技術鑑別出的伺服參數如速度迴路增益與等校償量等參數列於表 1，並根據圖 2 之方塊圖建立速度迴路模擬系統。從圖 5 之方形測試

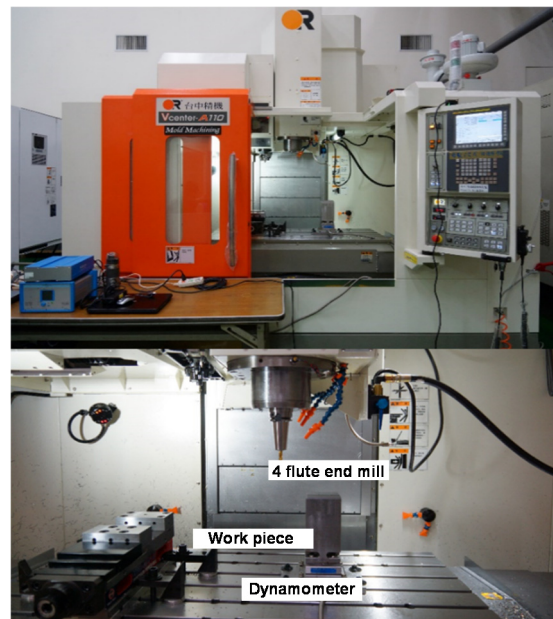


圖 4 實驗架構



表 1 速度迴路參數

Parameter	Unit	X axis	Y axis
K_p	$A/rad \cdot sec^{-1}$	1.7750	1.7750
K_i	A/rad	198	198
J	$kg \cdot m^2$	0.0175	0.0195
B	$N \cdot m/rad \cdot sec^{-1}$	0.0528	0.0413
K_t	$N \cdot m/A$	1.2	1.2
a	rad/s	1100	1100

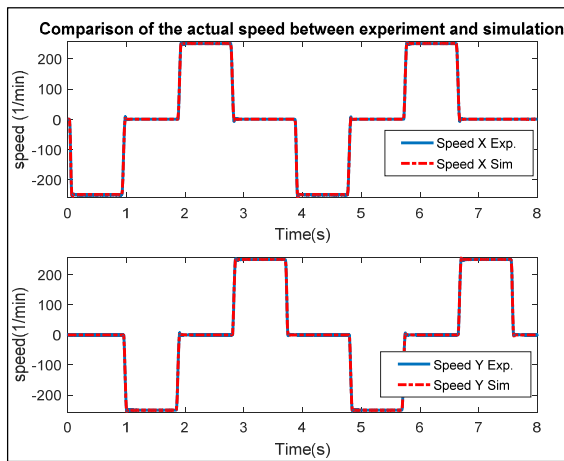


圖 5 速度迴路模型驗證

路徑之模擬與實驗之實際速度比較來看，所建立的速度迴路模型與參數能夠準確的模擬出實驗結果。

方程式(8)中切削模型的參數可利用如最小平方方法等系統鑑別技術，透過鑑別速度與切削力間的關係而得到其轉移函數係數；或是透過實驗方法分別鑑別出刀具剛性與切削係數後再將其他固定之切削條件帶入方程式(8)中得到其係數。然而當切削條件改變或是刀具不同時，切削模型之系統特性便會產生變化。因此若要維持整體進給率控制系統之穩定性與效能，就必須考慮切削條件不同時所造成的系統不確定性。透過實行常用之各種不同切削條件實驗並對其參數進行鑑別後，整理出其切削係數變化區間，作為設計控制器時銑削模型之不確定性變化範圍，如表 2 中所示。

表 2 切削模型參數範圍

Parameter	Unit	Minimum	Maximum
K_s	N/mm^2	800	3000
K_{tool}	N/mm	1500	8000
Ω	rpm	500	3000
N_t	$tooth$	2	4
b	mm	1	20

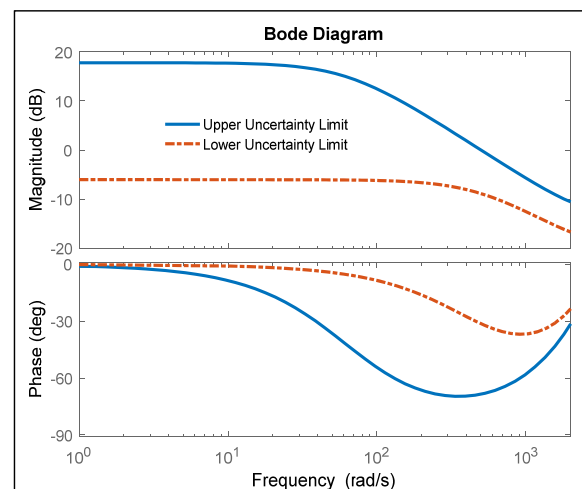


圖 6 銑削模型頻譜特性

表 3 銑削模型不確定性範圍

Parameter	Minimum	Maximum
α	0.6	0.9375
β	0.2	0.48
Bandwidth (rad/s)	64	521
DC gain (dB)	-6.02	17.78

強健性控制器設計與模擬實驗結果

根據上節所建立的銑削模型不確定範圍，銑削模型之頻譜特性變化如圖 6。可以發現當切削條件改變時其頻譜特性變化很大，主要的變化在於直流增益與頻寬大小。如表 3 所列，表 2 所變化的切削條件範圍對於銑削模型之影響為直流增益從 -6 dB 變化至 17.78 dB，頻寬變化從 64 rad/s 到 521 rad/s。



由於銑削模型特性受切削條件影響變化顯著，為了保證進給率控制系統之強健性，因此在設計控制器時需要考慮銑削模型之不確定性。否則當切削條件改變時，控制系統可能會有不穩定的情況發生。在本文中使用了量化回授理論(QFT)進行強健性控制器設計，QFT 的設計方法是強調「回授」的方式，在受控裝置有不確定量或外界干擾的情況下，仍能達到強健的穩定性及符合系統性能規格。其主要設計概念建立在頻譜的概念上，根據系統動態的不確定性或是實驗數據利用尼可士圖(Nichols Chart)建立真實受控場之模板，並依據所訂規格進行控制器設計。根據上述概念，所建立之受控場模板與設計後的系統開迴路頻譜如圖 7 所示，並可得到具強健性之進給率控制器方程式如下：

$$RFC(z) = \frac{0.026627z^3 - 0.024273z^2}{z^3 - 2.28069z^2 + 1.8621z - 0.5814} \quad (8)$$

為了驗證所設計的控制器是否在不同切削條件下仍保有強健性並確認其性能，首先針對整個閉迴路模型進行步階響應測試。如圖 8 所示，可以發現所設計的控制器即使是在如表 3 中兩種差異最大的切削條件下仍能保持系統穩定，且具有一定的性能。此外，為驗證強健性進給率控制器是否能在切深發生變化時仍維持切削力的目標。給定一組測試切削力變化如圖 8 中藍線所示，其切削條件為切寬 4 mm，切深變化從 3.5 mm 到 6.1 mm， K_s 為 2128 N/mm²， K_{tool} 為 3500 N/mm。圖 8 為比較有無使用強健性進給率控制的切削力圖，可以發現經由強健性進給率控制後除了切削力可以維持在所設定的 580 N 之外，並且能夠縮短切削時間。

在模擬驗證強健性進給率控制之穩定性與效能後，我們也進行實際切削實驗以驗證其可行性，切削實驗機台架構如圖 4 所示。在此設計一階梯狀工件如圖 9 所示，其切深變化為 4 mm 到 7 mm，切削實驗所使用的刀具與材料分別為 NACHI 4GE

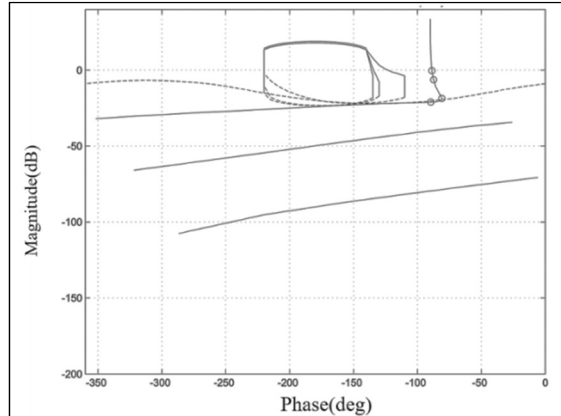


圖 7 量化回授理論(QFT)控制器設計

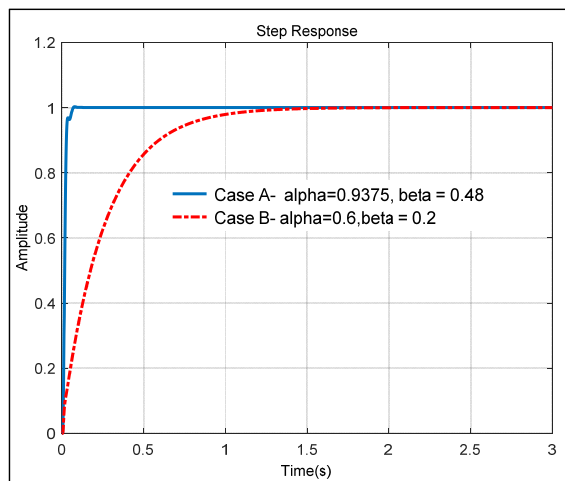


圖 8 強健性進給率控制系統之步階響應

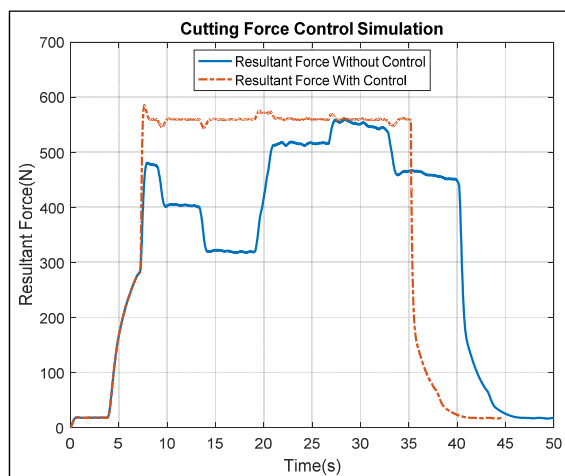


圖 9 強健性進給率控制模擬結果

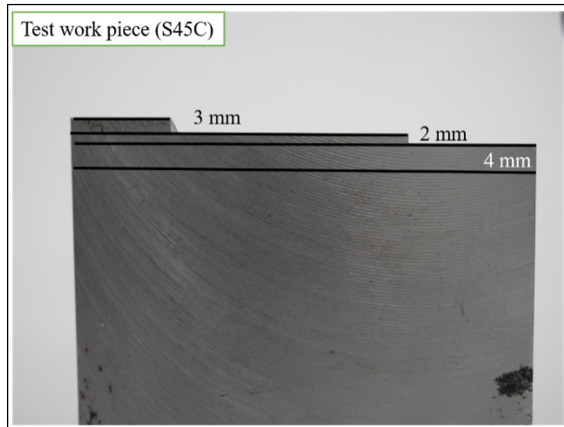


圖 10 強健性進給率控制實驗用工件

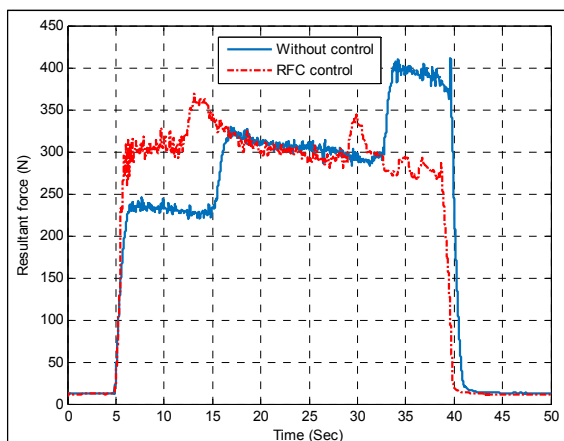


圖 11 強健性進給率控制實驗結果

LIST6274P 10S4 與 S45C，如圖 10。利用 FANUC FOCAS 進行實驗資料擷取在外部電腦進行強健性進給率控制演算後，再將需要改變的進給率百分比回傳給 FANUC 控制器進行控制，並使用切削動力計驗證經由強健性進給率控制後的切削力大小。從圖 11 中可以發現，藍色線為未進行控制之切削力曲線，其變化與工件形狀相同為階梯狀。紅色線表示在進行進給率控制後，其切削力幾乎可維持在給定的 300 N 附近。而在這個實驗中，因為所設定的切削力參考值大約是整段切削過程的平均值，因此整體的切削時間並未有明顯差異。

結論

本文提出基於量化回授控制理論之強健性控制器，可用來調整進給率以達到固定切削力的目標。透過推導以及鑑別速度迴路模型以及銑削模型的方式，建立起進給率控制之受控場，並且考慮不同切削條件下所造成的系統不確定性以完成強健性控制器之設計。所提出的強健性進給率控制器即使在不同的切削條件下仍能保有不錯的暫態響應，並且維持系統穩定性。從模擬結果來看，採用本文所提出之強健性進給率控制器不僅可以將切削力維持在一個固定值，且可降低約 20% 加工時間。最後將所提出之演算法與 FANUC 控制器進行整合並進行實際切削實驗，實驗結果顯示透過控制後，從切削動力計所量測的切削力幾乎符合所給定的參考值。未來將進一步對強健性進給率控制程式進行優化，以強化實際使用上之性能與便利性。

致謝

感謝台中精機股份有限公司、工研院智慧機械科技中心“整合伺服與切削動態模型之研究”之計畫支持，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] F. Koenigsberger and A. J. P. Sabberwal, “Chip section and cutting force during the milling operation,” *Annals of the CIRP* 10, 1961.
- [2] J. Tlustý and P. Macneil, “Dynamics of cutting forces in end milling,” *Annals of the CIRP* 24, 1975.
- [3] Y. Altintas, “Direct adaptive control of end milling process,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol.34, no.4, pp. 46, 1994.
- [4] C. C. H. Ma and Y. Altintas, “Direct adaptive cutting force control of milling processes,” *Automatica*, vol. 26, no. 5, pp. 899-902, 1990.
- [5] U. Zuperl, F. Cus, and M. Milfelner, “Fuzzy control strategy for an adaptive force control in end-milling,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164-165, pp. 1472-



- 1478, 2005.
- [6] T. Y. Kim and J. Kim, "Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 36, no. 8, pp. 925-937, 1996.
- [7] F. Cus and J. Balic, "Optimization of cutting process by GA approach," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 19, no. 1-2, pp. 113-121, 2003.
- [8] W. T. Kwon and D. Choi, "Radial immersion angle estimation using cutting force and predetermined cutting force ratio in face milling," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 15, pp. 1649-1655, 2002.
- [9] S. Jayaram, S. G. Kapoor, and R. E. DeVor, "Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, no. 2, pp. 265-281, 2001.
- [10] G. Newby, S. Venkatachalam, and S.Y. Liang, "Empirical analysis of cutting force constants in micro-end-milling operations," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 192-193, pp. 41-47, 2007.

