

Zastosowanie dwuwymiarowej transformaty falkowej do oceny chropowatości powierzchni frezowanych

The adaptation two-dimensional wavelet transform to assessment the surface roughness produced by face milling

WŁODZIMIERZ MAKIEŁA
DAMIAN GOGOLEWSKI*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.465

Prezentowane wyniki analizy chropowatości powierzchni z wykorzystaniem dwuwymiarowej transformaty falkowej. Badaniom poddano powierzchnie powstałe w procesie frezowania czołowego elementów ze stali 40HM. Wykazano, że poszczególne postaci falki bazowej mają zdolność do wykrywania charakterystycznych obszarów w sygnałach niestacjonarnych, jednak uwidaczniają powstałe wady powierzchni z różną intensywnością.

SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie czołowe, dwuwymiarowa analiza falkowa, chropowatość powierzchni

In this paper, authors present the research results of surface roughness analysis using the two-dimensional wavelet transform. The tests have been carried out on surface of 40HM steel produced in face milling process. The research results show the particular mother wavelet has ability to detect specific areas in non-stationary signals, however, they highlight the surface defects with different intensity.

KEYWORDS: face milling, two-dimensional wavelet analysis, surface roughness

Dynamiczny rozwój nauki i techniki implikuje miniaturyzację wytwarzanych elementów. To oznacza konieczność znacznie dokładniejszej obróbki oraz ciągłego monitorowania zmian wymiarowo-kształtowych elementów i ich warstwy wierzchniej. Klasyczna metoda analizy SGP z wykorzystaniem transformaty Fouriera jest coraz częściej zastępowana przez rozwiniętą w XX w. transformatę falkową [1, 2]. W 1910 r. węgierski naukowiec Alfred Haar po raz pierwszy użył pojęcia falki [3], jednak dopiero lata osiemdziesiąte XX w. przyniosły rozwój tego sposobu analizy danych. Wiązało się to m.in. z wynalezieniem przez Mallata piramidy dekompozycji [4] czy stworzeniem przez Daubechies pierwszych ortogonalnych falek niesymetrycznych [5]. Niewątpliwą zaletą funkcji falkowych jest możliwość analizy sygnałów zawierających niestacjonarność, czyli m.in. gwałtowne zmiany wysokości nierówności powierzchni (np. sygnał chropowatości powierzchni) [6].

Analiza falkowa jest szeroko stosowana do diagnozowania pracy urządzeń. Możliwość wykrywania w sygnale zaburzeń oraz wskazania miejsca ich powstania daje jej przewagę nad klasycznymi metodami w kontekście analizy diagnostycznej. W literaturze można znaleźć wiele przykładów jej zastosowania do analizy sygnałów jednowymiarowych, m.in. wibroakustycznych na potrzeby diagnozowania łożysk tocznych [7], analizy sił skrawania procesu frezowania [8] czy analizy sygnałów emisji akustycznej w kontekście diagnostyki procesu skrawania [9]. Diagnozowanie postaci wióra uzyskanego w procesie toczenia zbadali Teti i in. [10]. Analizę falkową do diagnostyki

stanu narzędzia podczas procesu toczenia zastosowali Jemielniak i in. [11], a do oceny stanu ściernicy – Liao [12]. W [13, 14] wykorzystano dyskretną analizę falkową do wykrywania uszkodzeń narzędzia. Broł i Grzesik [15] z użyciem ciągłej transformaty falkowej za pomocą falek Morlet oraz „meksykańskiego kapelusza” oceniali nie-regularności na profilach powstałych w wyniku toczenia oraz szlifowania.

Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że proces frezowania nie został kompleksowo zbadany. W opracowaniach odnoszących się do tej tematyki [8, 16, 17] brak jest dokładnej analizy chropowatości powierzchni powstałej po procesie frezowania.

Dwuwymiarowa transformata falkowa

Wraz z rozwojem metod numerycznych oraz technik komputerowych analiza falkowa znalazła zastosowanie również w bardzo złożonych modelach dwuwymiarowych, do analizy których potrzeba dużej mocy obliczeniowej. Niewątpliwą zaletą analizy falkowej jest wykorzystywanie zmiennej wielkości okna w zależności od rodzaju przedstawianych informacji. Do przedstawienia informacji wysokoczęstotliwościowej stosowane są krótkie odstępy próbkowania sygnału, natomiast w ocenie niskoczęstotliwościowej odstępy są znacznie większe. Istotną kwestią jest wybór falki bazowej, którą będzie analizowany sygnał, gdyż wyniki otrzymywane na kolejnych poziomach dekompozycji będą się w coraz większym stopniu różniły [18].

Dyskretną dwuwymiarową transformatę falkową definiuje się ze wzorów (1, 2) [19]:

$$W_{\phi}(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \phi_{j_0, m, n}(x, y) \quad (1)$$

$$m, n = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$$

$$W_{\phi}^i(j_0, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \phi_{j_0, m, n}^i(x, y) \quad (2)$$

$$i = \{H, V, D\}$$

gdzie: $f(x, y)$ – dwuwymiarowa funkcja o wymiarach $M \times N$, $W_{\phi}(j_0, m, n)$ – sygnał aproksymacji, $W_{\phi}^i(j_0, m, n)$ – sygnały detali, $\phi(x, y)$ – funkcja skalująca 2D, $\phi(x, y)$ – falka matka 2D.

W analizie sygnału wejściowego za pomocą dwuwymiarowej transformaty falkowej na każdym poziomie dekompozycji następuje jego podział na cztery inne sygnały – sygnał aproksymowany oraz sygnały detali poziomych, pionowych i ukośnych. Sygnał aproksymowany odpowiada

* Dr hab. inż. Włodzimierz Makiela prof. PŚk (wmakiela@tu.kielce.pl), mgr inż. Damian Gogolewski (dgogolewski@tu.kielce.pl) – Politechnika Świętokrzyska

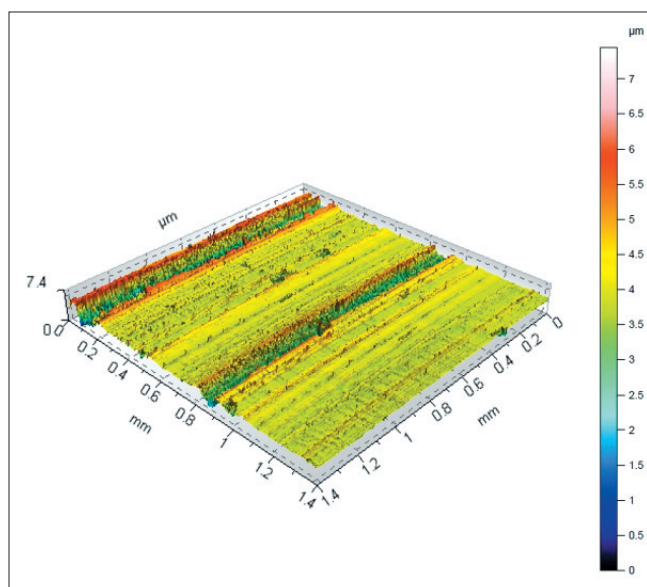
informacjom globalnym powierzchni, natomiast powstałe detale – informacjom szybkozmiennym. Na każdym kolejnym poziomie dekompozycji następuje coraz większe wygładzenie sygnału wejściowego. W oparciu o informacje zawarte w detalach można stwierdzić, że poziom pierwszy i drugi zawierają jedynie szумы. Dopiero analiza kolejnych poziomów dekompozycji pozwala na wykrycie istotnych informacji [6].

Wyniki obliczeń

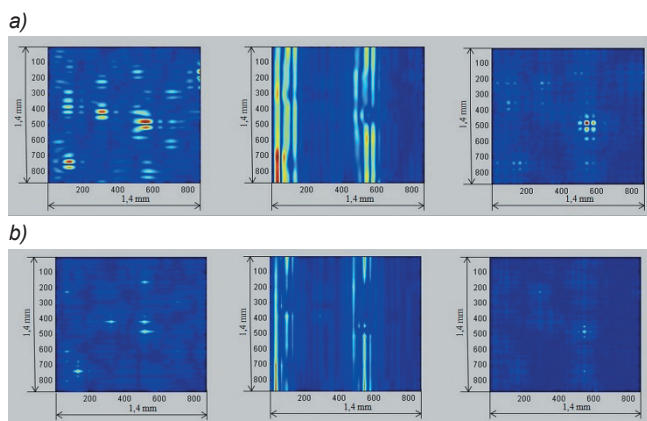
Badania przeprowadzono dla 11 próbek powstałych w wyniku procesu frezowania czołowego elementu ze stali 40HM przy zadanych parametrach: posuw $f_z = 0,01$ mm/ostre, głębokość skrawania $a_p = 0,2$ mm, oraz zmieniającej się prędkości skrawania v_c (w m/min) określonej w tablicy.

TABLICA. Prędkość skrawania próbek

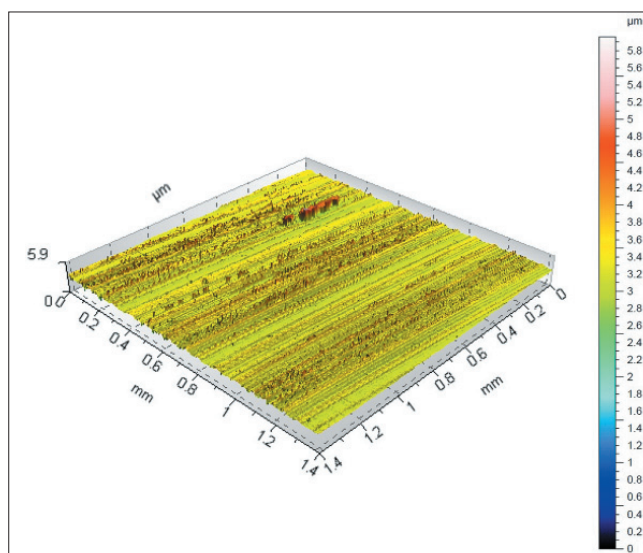
| Nr próbki | v_c , m/min | Nr próbki | v_c , m/min | Nr próbki | v_c , m/min |
|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| 1 | 200 | 5 | 280 | 9 | 360 |
| 2 | 220 | 6 | 300 | 10 | 380 |
| 3 | 240 | 7 | 320 | 11 | 400 |
| 4 | 260 | 8 | 340 | | |



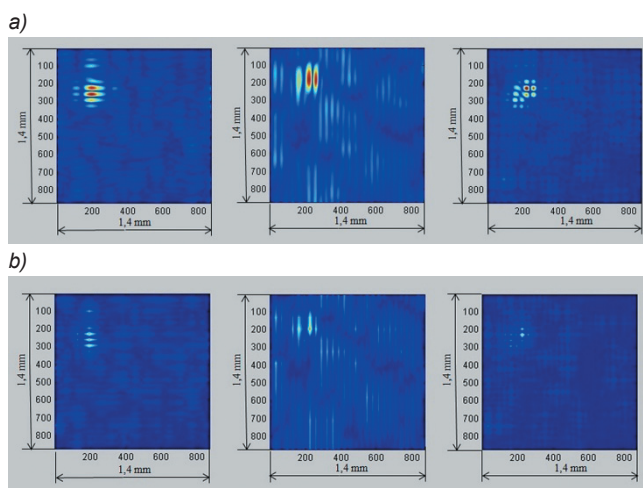
Rys. 1. Obraz izometryczny powierzchni – próbka nr 1



Rys. 2. Detale poziome, pionowe oraz ukośne na szóstym poziomie dekompozycji – próbka nr 1: a) *db6*, b) *coif1*



Rys. 3. Obraz izometryczny powierzchni – próbka nr 11



Rys. 4. Detale poziome, pionowe oraz ukośne na szóstym poziomie dekompozycji – próbka nr 11: a) *db6*, b) *coif1*

Analizowano sygnały chropowatości powierzchni. Każda powierzchnia została zbadana za pomocą 10 falek bazowych. W referacie omówiono wyniki analizy dwóch wybranych falek oraz powierzchni. Na rys. 1 przedstawiono widok izometryczny powierzchni próbki nr 1, na rys. 2a, b – powstałe detale na 6. poziomie dekompozycji (od lewej: poziome, pionowe, ukośne) w wyniku analizy za pomocą falek bazowych *db6* oraz *coif1*.

Na rys. 1 widać dwa podłużne, charakterystyczne wgłębienia. Analiza z wykorzystaniem falek bazowych uwiarygodniła charakter nierówności.

Analogiczne obrazy sporządzono dla próbki nr 11. Na rys. 3 przedstawiono widok izometryczny badanej powierzchni, a na rys. 4 – powstałe po analizie detale.

Analiza próbki nr 11 pozwoliła na wyodrębnienie miejsca i charakteru powstałej w trakcie obróbki wady powierzchni. W jawny sposób została uwypuklona charakterystyczna nierówność, przy czym lepsze efekty uzyskano dla falki *db6*.

Podsumowanie

Dwuwymiarowa transformata falkowa nie była dotychczas stosowana do oceny nierówności powierzchni części maszyn. Możliwość analizy sygnałów niestacjonarnych, nieokresowych stanowi o niewątpliwiej przewadze tej

metody nad klasycznymi, obecnie stosowanymi narzędziami, m.in. analizą Fouriera.

Badania wykazały, że dwuwymiarowa transformata falkowa jest przydatnym narzędziem w analizie struktury geometrycznej powierzchni frezowanych czołowo.

Obliczenia numeryczne potwierdziły, że podobnie jak w transformacie jednowymiarowej należy poszukiwać optymalnej postaci falki bazowej, która pozwoli na wyrażoną selekcję wad powierzchni obrabianej. W przypadku analizowanych próbek najlepsze rezultaty otrzymano dla falki db6.

Transformata falkowa wykrywa gwałtowne zmiany wysokości nierówności występujących na powierzchni. Na podstawie analizy sygnału z wykorzystaniem dwuwymiarowej transformaty falkowej można zarówno stwierdzić występowanie charakterystycznych nierówności, jak i wskazać ich dokładną lokalizację.

LITERATURA

1. Boryczko A. „Profile irregularities of turned surface as a result of machine tool interactions”. *Metrology and Measurement System*. Vol. XVIII, No. 4 (2011): pp. 691–700.
2. Stępień K. „Research on a surface texture analysis by digital signal processing method”. *Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette*. Vol. 21/3 (2014): pp. 485–493.
3. Haar A. „Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme”. *Mathematische Annalen*. Leipzig (1910): pp. 331–371.
4. Mallat S.G. „A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 11, Nr. 7 (1989): pp. 674–693.
5. Daubechies I. „Orthonormal bases of compactly supported wavelets”. *Communications on Pure and Applied Mathematics*. Vol. 41 (1988): pp. 909–996.
6. Zawada-Tomkiewicz A. „Estimation of surface roughness parameter based on machined surface image”. *Metrology and Measurement System*. Vol. XVII, No. 3 (2010): pp. 493–504.
7. Wysogład B. „Metody diagnozowania łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej”. *Diagnostyka*. Vol. 29 (2003): s. 47–52.
8. Zhai L.Y., Er M.J., Li X., Gan O.P., San L. „Wavelet-based analysis of force signal for monitoring and prediction of cutting performance in high-speed milling processes”. *Engineering Letters*. Vol. 19 (2011): pp. 155–158.
9. Krajewska J. „Wybrane problemy diagnostyki procesu obróbki materiałów trudnoskrawalnych”. *Konferencja Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*. T. 5 (2014): s. 749–759.
10. Teti R., Jawahir L.S., Jemielniak K., Segreto T., Chen S., Kossakowska J. „Chip from monitoring through advanced processing of cutting force signals”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 55, No. 1 (2006): pp. 75–80.
11. Jemielniak K., Urbański T., Kossakowska J., Bombiński S. „Multi-feature fusion based tool condition monitoring in rough turning of Inconel 635”. *Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting*. Gifu, Japan. Vol. 2 (2010): pp. 285–290.
12. Liao W.T., Ting C., Qu J., Blau P.J. „A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring”. *Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 47 (2007): pp. 580–592.
13. Kwak J.S. „Application of wavelet transform technique to detect tool failure in turning operations”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 28 (2006): pp. 1078–1083.
14. Li X., Dong S., Yuan Z. „Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 39 (1999): pp. 1935–1944.
15. Brol S., Grzesik W. „Zastosowanie ciągłej transformaty falkowej do oceny profilu chropowatości powierzchni po obróbce zahartowanej stali AISI52100”. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*. T. 26, nr 2 (2006): s. 103–112.
16. Romero-Troncoso R.J., Herrera-Ruiz G., Terol-Villalobos I., Jauregui-Correa J.C. „FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines”. *Mechatronics*. Vol. 14, (2004): pp. 439–454.
17. Kasashima N., Mori K., Herrera-Ruiz G. „Diagnosing cutting tool condition in milling using wavelet transform”. *Advancement of Intelligent Production*. (1994): pp. 339–344.
18. Stępień K., Makiela W., Stoic A., Smardzic I. „Defining the criteria to select the wavelet type for the assessment of surface quality”. *Tehnicki Vjesnik – Technical Gazette*. Vol. 22/3 (2015): pp. 781–784.
19. Zhang H., Dai S. „Image inpainting based on wavelet decomposition”. *Procedia Engineering*. 29 (2012): pp. 3674–3678.