

Development of techniques improving functional and programming abilities of intelligent CNC machine tools

Rozwój technik wspomaganie funkcjonowania i programowania inteligentnych obrabiarek CNC

KRZYSZTOF JAROSZ
WIT GRZESIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2024.7.12>

This paper covers the areas of importance in the development of intelligent machine tools (IMTs), including: information/knowledge-based computing, advanced virtual modelling of machining systems, real-time process simulations with the use of digital twins (DTs) and intelligent control strategies based on the STEP-NC standards. Select examples of current industrial implementations are discussed, along with prognosing of future development trends. Moreover, the importance of human-machine interaction (HMI) and considering operator behavior and skill levels in the development of HMI is signified.

KEYWORDS: intelligent machine tool, information exchange, virtual simulation, STEP-NC interface

W artykule przedstawiono ważne kierunki rozwoju inteligentnych obrabiarek CNC obejmujące: przetwarzanie wiedzy/informacji, zaawansowane modelowanie wirtualne systemu obróbkowego, symulację procesu w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem techniki bliźniaka cyfrowego oraz inteligentne sterowanie na bazie interfejsu STEP-NC. Podano przykłady współczesnych osiągnięć w skali przemysłowej i wytypowano kierunki dalszego rozwoju. Wskazano na ważną rolę doświadczenia i zachowania operatora w doskonaleniu interakcji z interfejsem człowiek-maszyna (HMI).

SŁOWA KLUCZOWE: inteligentna obrabiarka, wymiana informacji, symulacja wirtualna, STEP-NC interfejs

Wprowadzenie

W ostatniej dekadzie obserwuje się wyraźną intensyfikację prac badawczo-rozwojowych (R&D) oraz wdrożeniowych nad inteligentnymi obrabiarkami (IMT – *intelligent machine tool*) związanych z rozwojem wirtualizacji modelowania i programowania oraz przetwarzania i analizy informacji wykorzystywanych do podejmowania decyzji w zakresie działań optymalizujących proces obróbki i monitorujących. Na rys. 1 przedstawiono przyszłościową strukturę inteligentnej obrabiarki. Została ona opracowana przez badaczy japońskich około 20 lat temu i dobrze oddaje postęp, jaki się dokonał w ciągu dwóch ostatnich dekad. Kluczowe zadania w tym zakresie usytuowano na poziomach 3 i 4.

Należy zauważyć, że w konwencjonalnej obrabiarence CNC można wyróżnić dwa główne poziomy systemu sterowania: serwo-sterowanie (poziom 1) i interpolację (poziom 2) do sterowania ruchami osi. Z kolei system sterowania inteligentnej obrabiarki CNC ma dwa dodatkowe poziomy niezbędne do osiągnięcia zaawansowanego sterowania, tj.: sterowanie adaptacyjne (AC) (poziom 3) i nadzorowanie jako najwyższy poziom (poziom 4), niezbędny do inteligentnego monitorowania procesu obróbki. Jego zadaniem jest

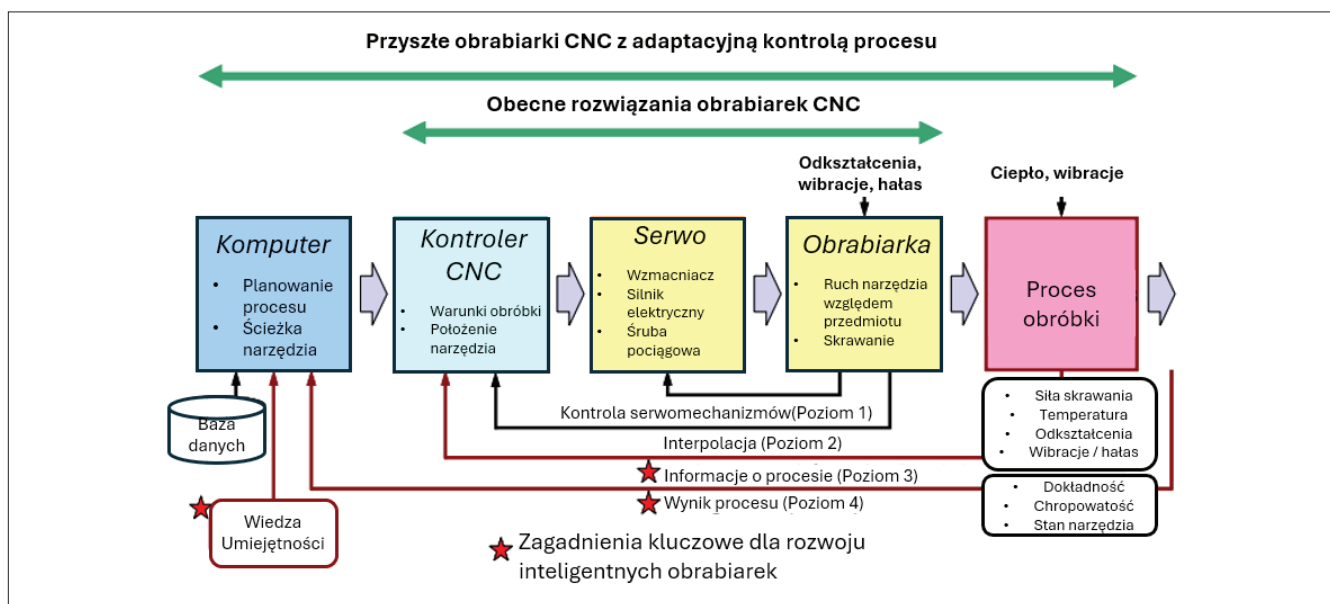


Fig. 1. Functional framework of an intelligent machine tool [1]

Rys. 1. Struktura funkcjonalna inteligentnej obrabiarki [1]

* PhD Candidate Krzysztof Jarosz – Rochester Institute of Technology, USA (corresponding author)

Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik – wit.grzesik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3898-5119> – Opole, Polska

wykrywanie bieżącego stanu obróbki niezależnie od warunków skrawania i rodzaju realizowanej operacji. W tym przypadku niezbędne jest efektywne sprzężenie zwrotne w przepływie informacji odnośnie do uzyskanych wyników procesu (również na podstawie pomiarów obrabianej części) oraz ich ewaluacji. Dodatkowym warunkiem funkcjonalności IMT jest wdrożenie strategii autonomicznego planowania procesu jako jednej z funkcji. Gwarantuje to generowanie elastycznego i adaptacyjnego planu obróbki (marszruty technologicznej). To zadanie można zrealizować przez wprowadzenie kilku funkcji w zakresie planowania procesu i przetwarzania informacji, m.in.: planowania operacyjnego, doboru narzędzi skrawających oraz wyznaczania parametrów skrawania i generowania ścieżki ruchu narzędzia dla każdej operacji obróbki. W kontekście przetwarzania informacji bierze się pod uwagę wyniki analizy danych produktu i rozpoznawanie cech skrawania (jako elementy koncepcji FBM – *feature-based machining*) [2].

Aby samodzielnie wygenerować plan operacji, potrzeba kilku funkcji planowania i przetwarzania informacji. Planowanie operacji, wybór narzędzia skrawającego, przypisanie parametrów skrawania i generowanie ścieżki narzędzia dla każdej operacji obróbki są wymagane na poziomie maszyny. Analiza danych produktu i rozpoznawanie cech obróbki są ważnymi zagadnieniami w ramach przetwarzania informacji.

Na rys. 2 przedstawiono wpływ kluczowych technik stosowanych w sterowaniu, monitorowaniu i planowaniu procesu, stosowaniu *know-how* oraz przetwarzaniu danych i przesyłaniu informacji na rozwój inteligentnych obrabiarek CNC [1]. Do głównych kierunków wpływu zaliczono [1, 2]:

- wzrost znaczenia sterowania procesem i jakością w porównaniu ze sterowaniem adaptacyjnym – do osiągnięcia tego celu konieczne są: dynamiczne gene-

rowanie ścieżki narzędzia i modyfikacja parametrów skrawania w trakcie procesu (*in-process*) oraz inteligentne monitorowanie procesu,

- osiągnięcie sensownej strategii sterowania procesem i miarodajnych wskaźników ewaluacji jakości obróbki,
- konieczność wykorzystania wiedzy oraz uczenia się na podstawie zgromadzonej wiedzy, *know-how* i umiejętności w odniesieniu do operacji obróbkowych,
- opracowanie strategii planowania, która umożliwi tworzenie elastycznych i adaptacyjnych planów obróbki oraz dobór narzędzi i parametrów skrawania,
- autonomiczne tworzenie planów operacji na bazie analizy danych o produkcie (*product data analysis*) i rozpoznawania cech obróbki (*feature recognition*).

Zasady wymiany informacji w inteligentnych obrabiarkach

W rozwoju inteligentnych obrabiarek (IMT) i całych systemów wytwórczych ważną rolę odgrywa sfera informacyjna. Zwracano już na to uwagę w początkowej fazie ich wdrażania w przemyśle [1, 3]. Miało to związek z przypisaną IMT zdolnością do gromadzenia informacji i wykorzystywania ich w nowych warunkach procesu oraz operacjach obróbkowych. W zaawansowanych, inteligentnych obrabiarkach stosuje się dwustopniowe przetwarzanie informacji obejmujące ścisłą współpracę obliczeń brzegowych (*edge computing*) i obliczeń w chmurze wirtualnej (*cloud computing*) – jako ich synonimy stosuje się także sformułowania: „przetwarzanie brzegowe” i „przetwarzanie w chmurze” [4]. W ten sposób tworzy się nową architekturę IMT oznaczoną akronimem IMT-ECC (*edge-cloud collaboration*), co przedstawiono schematycznie na rys. 3. Cały system informacyjny w obrabiarce IMT-ECC składa się z trzech warstw: akwizycji danych, komunikacji sieciowej i modułu ECC.

Kluczowe techniki	Koncepcja >>>> Potwierdzenie >>>> Praktyka
Sterowanie ruchem	—————>
Sterowanie adaptacyjne	—————>
Sterowanie procesem i jakością	—————>
Monitorowanie	—————>
Inteligentne monitorowanie	—————>
Koncepcja otwartej architektury	—————>
Planowanie procesu	—————>
Planowanie operacji	—————>
Wykorzystanie <i>know-how</i>	—————>
Uczenie <i>know-how</i>	—————>
Komunikacja sieciowa	—————>
Obliczenia rozproszone	—————>

Fig. 2. Key techniques influencing the development of IMTs [1, 2]
Rys. 2. Kluczowe techniki wpływające na rozwój IMT [1, 2]

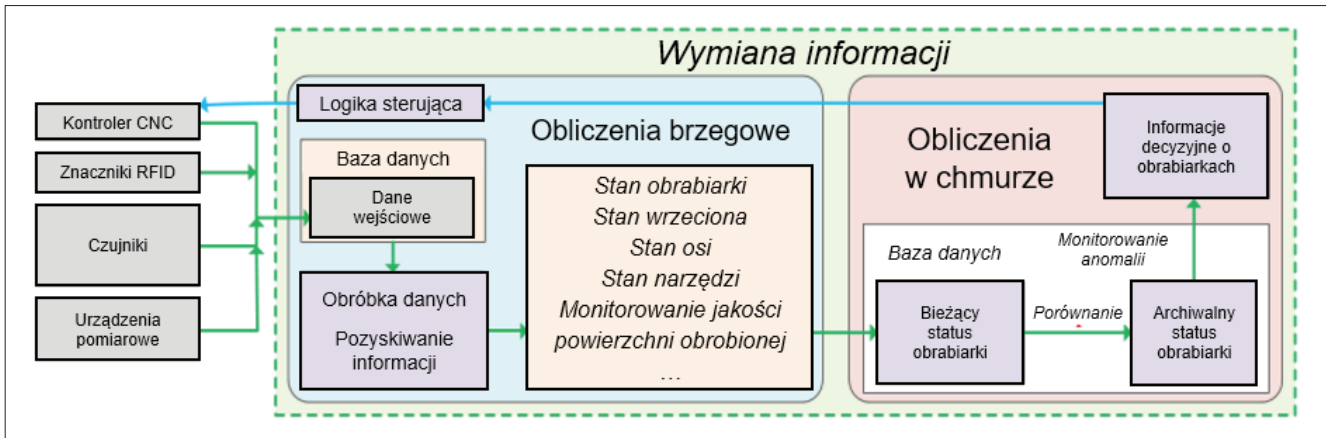


Fig. 3. Schematic representation of collaboration between edge and cloud computing in IMT [2, 4]

Rys. 3. Schemat współpracy przetwarzania brzegowego i w chmurze w IMT [2, 4]

W inteligentnej obrabiarko o architekturze IMT-ECC gromadzenie i przetwarzanie danych w chmurze ma za zadanie optymalizację algorytmów modeli wirtualnych [3], podczas gdy przetwarzanie brzegowe spełnia funkcję łączenia (fuzji), wstępnego przetwarzania danych źródłowych i analizy przesyłanych danych o stanie obrabiarki jako odpowiedź w pętli sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym. W ten sposób inteligentna obrabiarka, a przez to również efektywność programowania, zwiększa się jako rezultat współpracy systemów ECC na poziomie danych, informacji i wiedzy.

Rozwój modelowania wirtualnego w czasie rzeczywistym

W [2] omówiono podstawy i możliwości praktycznego zastosowania różnych technik wirtualnej rzeczywistości do modelowania i symulacji procesów i systemów obróbkowych, a w konsekwencji wspomagania programowania obrabiarek CNC. Należy jednak zaznaczyć, że nie uwzględniają one w planowaniu ścieżki narzędzia właściwości dynamicznych obrabiarki i zmian procesu w czasie (*time-dependent processes* – TDP), które mogą wpłynąć na właściwości obrobionej powierzchni [3, 5]. Z tych względów konieczne staje się lokalne korygowanie ścieżki narzędzia i zaplanowanie zmiany wartości posuwu.

Problem ten dotyczy zwłaszcza generowania ścieżek ruchu narzędzia dla powierzchni złożonych z nieregularnych śladów. Zagadnienie klasyfikacji ścieżek ruchu narzędzia i ich dopasowania do skanowanych powierzchni opisano w [5].

W celu osiągnięcia w dużym stopniu rzeczywistej symulacji kinematyki obrabiarki w module symulacyjnym można wziąć pod uwagę dynamiczne zachowanie się obrabiarki i dodatkową pętlę sprzężenia zwrotnego między obrabianym przedmiotem i układem sterowania NC, aby uwzględnić wpływ zmiany kształtu przedmiotu (rys. 4). W normie DIN VDI 3441 wyróżniono trzy charakterystyki obrabiarki: statyczną, dynamiczną i cieplną. Przedmiot obrabiany jest złożony z dużych elementów sieciowych, tzw. voxeli, i symulacja obróbki odbywa się przez ich sukcesywne usuwanie. W czasie symulacji rejestrowane są zmiany położenia sterowanych osi wynikające z usuwania voxelu, które są przekazywane do modelu symulacyjnego kinematyki obrabiarki, a na tej podstawie wyznaczany jest nowy punkt centralny narzędzia (*tool center point* – TCP). TCP jest następnie wykorzystywany w symulacji usuwania materiału z przedmiotu do określania nowych parametrów skrawania. Ostateczne wyniki położenia osi sterowanych są przesyłane zwrótnie do fizycznego układu NC. Ma więc miejsce zwrotna wymiana informacji między bliźniakiem cyfrowym i fizycznym [7, 8].

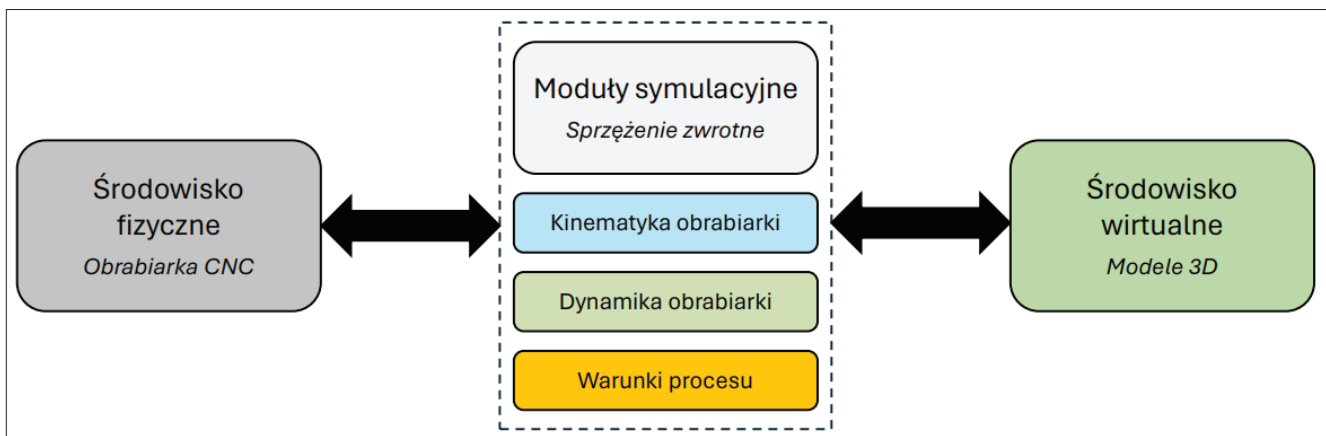


Fig. 4. Concept of a modified real-time simulation of CNC machine tools [2, 6]

Rys. 4. Konceptja zmodyfikowanej symulacji obrabiarki CNC w czasie rzeczywistym [2, 6]

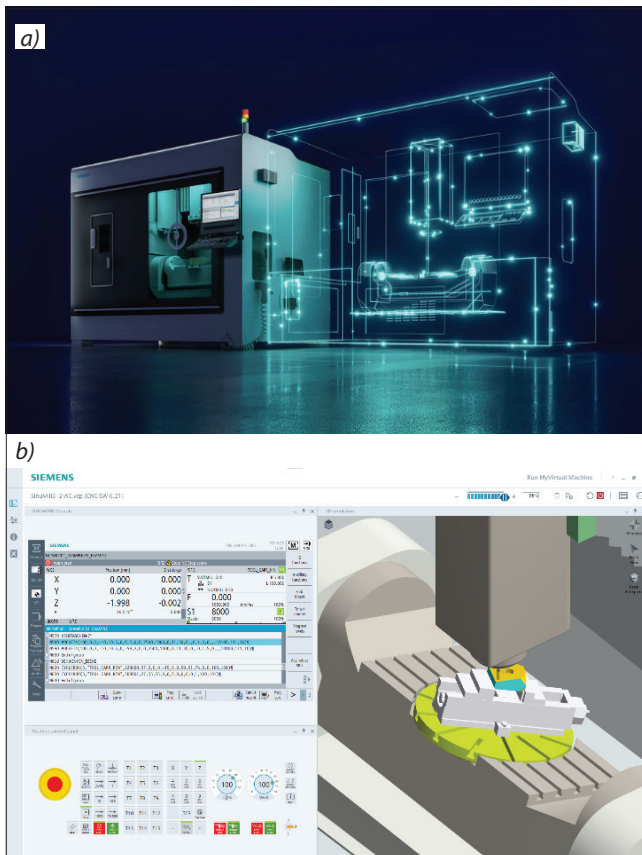


Fig. 5. Virtual representation of a CNC machine tool in the form of a digital twin in the Sinumerik One control system (a) and an example of an integrated virtual model of a titling rotary including machining simulations (b) [9]

Rys. 5. Odzworowanie wirtualne obrabiarki w postaci cyfrowego bliźniaka w systemie sterowania Sinumerik One (a) i przykład wirtualnego modelu stołu obrotowo-uchyłnego i obróbki przedmiotu (b) [9]

Przykładem komercyjnego zastosowania koncepcji cyfrowego bliźniaka (DT) w programowaniu obrabiarek CNC są pakiety oprogramowania Create MyVirtual Machine i Run MyVirtual Machine do wirtualnego sterowania cyfrowego Sinumerik One oferowane przez firmę Siemens [9]. W 2023 r. „natywny” system sterowania Sinumerik One był testowany w kontekście tworzenia i użytkowania cyfrowego bliźniaka na 5-osiowej obrabiarkie szkoleniowej SLV EDU firmy SolidVision [9]. W rezultacie operator obrabiarki dysponuje jej pełnym odwzorowaniem wirtualnym na komputerze klasy PC w postaci cyfrowego bliźniaka, jak na rys. 5.

Integralność programowa jest zapewniona na etapie prototypowania, uruchamiania, programowania i serwisowania obrabiarki oraz we współpracy z systemami wspomaganie CAD/CAM/CNC. Cyfrowy bliźniak jest w takich przypadkach tworzony w środowisku Create MyVirtual Machine. Możliwa jest także konfiguracja wirtualna części systemu CNC, sterowników PLC i interfejsu HMI oraz części mechanicznej obrabiarki. Poziom wirtualnego odwzorowania obrabiarki dochodzi do 99%. W rezultacie zastosowania DT skraca się czas wdrożenia nowej obrabiarki w produkcji do 30% i czas jej uruchomienia do 50%. Działania te korespondują w pełni z wdrażaniem do polskiego przemysłu strategii Przemysłu 4.0.

W przypadku realizacji zadań operatora ważna jest możliwość symulacji oceny ryzyka kolizji i pomiarów przedmiotu z uwzględnieniem przesunięcia punktu zerowego. Z kolei użytkowanie oprogramowania Run MyVirtual Machine powoduje, że programowanie, przygotowanie produkcji i nauczanie obsługi może w znaczący sposób zastąpić zadania realizowane na rzeczywistej 5-osiowej maszynie.

Rozwój interfejsu STEP-NC

Rozwój interfejsu STEP-NC jest zasadniczo skoncentrowany na realizacji inteligentnego sterowania, co powoduje, że obrabiarka/sterowniki CNC podlegają działaniom inteligentnym, takim jak optymalizacja obróbki. Przykładem może być autonomiczny STEP-podporządkowany CNC (ASNC-autonomous STEP-compliant CNC), który został opracowany w Państwowym Laboratorium Badawczym do Technologii STEP-NC w Korei Południowej. Dane zapisane w formacie ISO 14649 są konwertowane na format ASNC, a następnie przetwarzane na graf sekwencji procesu (PSG – *proces sequence graph*) [10]. PSG tworzy się z nieliniowych sekwencji kroków roboczych, stosując relacje *i-czy* (AND-OR). To zapewnia dodatkową elastyczność w nabyciu odporności na nieprzewidziane zdarzenia i optymalizację sekwencji procesu. Kolejny postęp dotyczy zamiany języka EXPRESS (ISO 10303 AP21) na uniwersalny język znaczników XML (ISO 10303 AP28), dzięki czemu transfer danych jest dostosowany do e-wytwarzania (*e-manufacturing*). Model danych umożliwia umiejscowienie, ekstrakcję/wybieranie i archiwizację ścieżek narzędzia w formacie XML (*extensive markup language*). Tworzy się zestaw instrukcji do formatowania tekstów w sposób czytelny dla maszyn. Programy STEP-NC są tworzone przez moduł wprowadzania danych (XML DATA INPUT) i interpretator danych (INTERPRETER) na podstawie dostarczanych plików CAD.

Na rys. 6. przedstawiono koncepcję samouczącego się systemu STEP-NC funkcjonującego w pętli

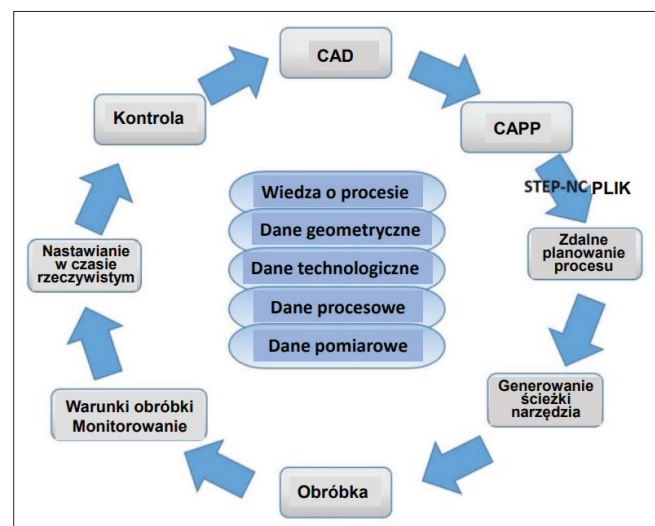


Fig. 6. An example of a closed-loop self-learning STEP-NC machining system [2, 10]

Rys. 6. STEP-NC system obróbkowy w pętli zamkniętej i samouczący się [2, 10]

zamkniętej, który wykorzystuje informacje wysokiego poziomu, w tym dane o warunkach procesu obróbki i wyniki kontroli przeprowadzanej w trybie *on-line and real-time*. Interpretator STEP-NC dopasowuje parametry technologiczne obróbki na 5-osiowej obrabiarkie CNC stosownie do wiedzy o procesie, stanu obrabiarki i narzędzia. Sensory działające w trybie sprzężenia zwrotnego dostarczają niezbędnej wiedzy o przebiegu procesu obróbki i na tej podstawie ustalane są optymalne parametry technologiczne z użyciem algorytmu sterowania adaptacyjnego. Po skompletowaniu kroku roboczego obróbki są one weryfikowane na podstawie kontroli w trybie *on-line* wymaganych tolerancji wymiarowych [11].

Na bazie platformy STEP-NC może być rozwijana koncepcja zrównoważonego wytwarzania sprawdzająca się do tworzenia oszczędnego energetycznie środowiska wytwórczego oraz wytwarzania inteligentnego, które wymaga wprowadzenia inteligentnych sterowników na poziomie przemysłowym [11, 12].

Wymiana informacji między systemami CAD i CAM

Początkową koncepcję wymiany informacji w systemie CAD/CAM w formie sprzężenia zwrotnego przedstawiono na rys. 7. Spełnia ona, jak już wspomniano, trzy podstawowe funkcje, tj.: monitorowania, sterowania adaptacyjnego i uczenia. Składa się z systemu CAD, bazy danych i sterownika w czasie rzeczywistym.

Obrabiarka jest wyposażona w 6-osiowy sensor siły, który ma umożliwić wyznaczenie wykresu stabilności (*stability lobe diagram*) [4]. Parametry skrawania, takie jak: głębokość skrawania, prędkość (równoważna prędkość obrotowa wrzeciona obrabiarki) i posuw, są modyfikowane w sposób dynamiczny jako rezultat wyznaczonych sekwencji stabilnych stanów skra-

wania (co jest także podstawą wyznaczenia wykresu stabilności procesu). Ma on decydujące znaczenie w uniknięciu skrawania w obszarach występowania drgań samowzbudnych (*chatter*) [2, 4].

W sterowaniu jakością z uwzględnieniem w planowaniu ścieżki narzędzia właściwości dynamicznych obrabiarki i zmian procesu w czasie (*time-dependent processes* – TDP), które mogą wpłynąć na właściwości obrabianej powierzchni, analizuje się problem odwrotny i współbieżny (dosłownie: „do przodu”), jak na rys. 8 [3, 5]. W tym drugim przypadku programowanie jest wspomagane symulacją tworzenia powierzchni w czasie rzeczywistym [14]. Podobnie jak w tradycyjnym planowaniu procesu najpierw (I) definiuje się wymaganą topografię powierzchni i zakłada się ograniczenia odnośnie do zakresu charakterystyk ilościowych procesu, tj. wydajności objętościowej (MRR), nakładania warstw lub zmian struktury geometrycznej na podstawie uwzględnienia odchyłeń od topografii wyjściowej. Te możliwości są osiągalne w systemie CAD na podstawie danych przedmiotu przed obróbką lub po niej czy korekcji zarysu, zwykle na podstawie pomiarów 3D na maszynie współrzędnościowej.

W następnym kroku (II) podejmuje się decyzję co do warunków procesu oraz identyfikuje/prognozuje tzw. funkcję wpływu procesu (*proces influence function* – PIF). Kolejny krok (III) dotyczy wyznaczenia danych CL toru ruchu narzędzia na podstawie wstępnie zdefiniowanej całkowitej ścieżki narzędzia. W tym przypadku informacje są dostępne w użytkowanym programie CAM. Wygenerowane informacje służą do optymalizacji posuwu na podstawie pomiarów składowych sił skrawania, czyli w sposób pośredni zbliżony co do zasady w trybie *post-proces*. Postępuje się tak, ponieważ źródłowe dane do wyznaczenia kluczowego wskaźnika przebiegu (*key performance indicator* – KPI), będącego podstawą optymalizacji

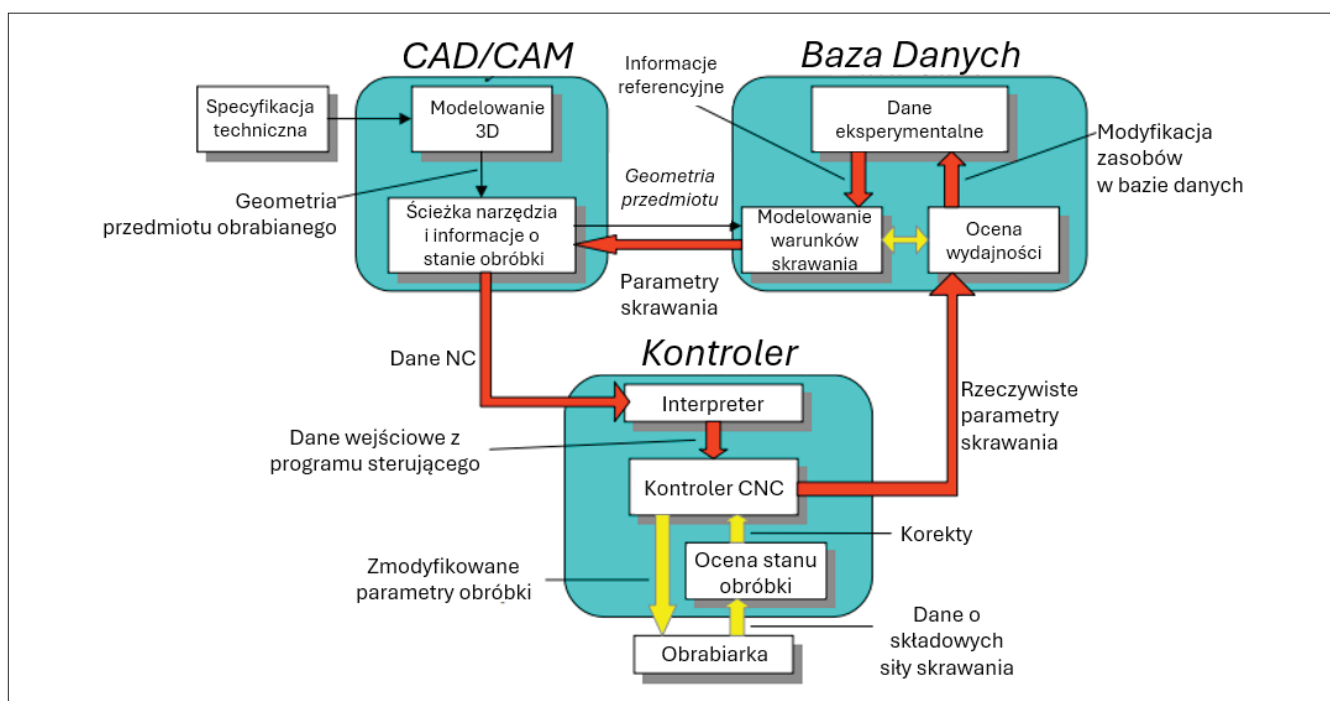


Fig. 7. Configuration of a CAD/CAM system with mutual information feedback [1]

Rys. 7. Konfiguracja systemu CAD/CAM z wzajemnym sprzężeniem informacyjnym [1]

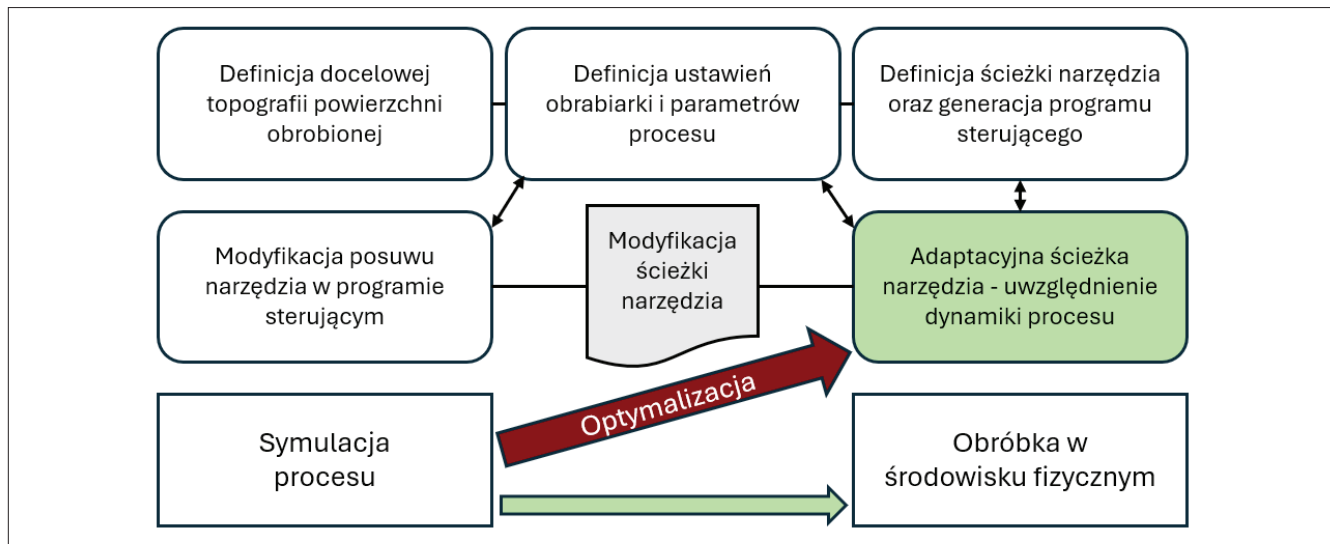


Fig. 8. Overview of the process planning flow in TDP [5]

Rys. 8. Poglądowa ilustracja sekwencji działań w czasowym planowaniu procesu [5]

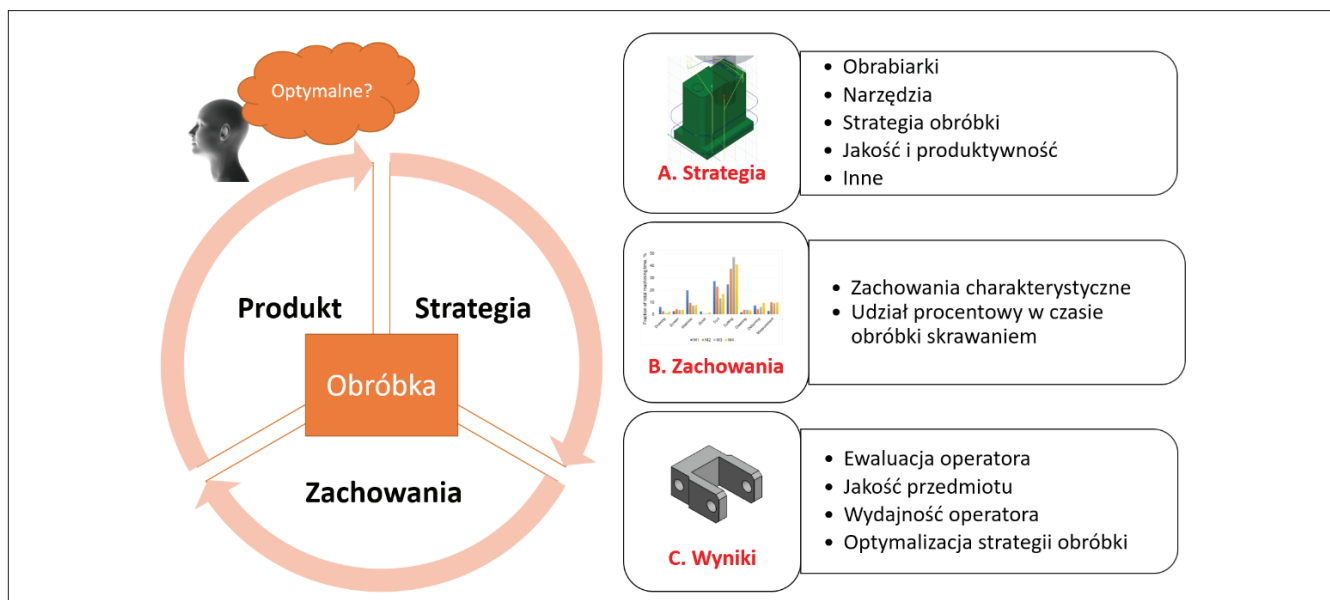


Fig. 9. A conceptual study on human behavior and the influence of MT operator experience on process outcomes and human-machine interaction [15]

Rys. 9. Koncepcja badań nad zachowaniem oraz wpływem doświadczenia operatorów obrabiarek na wyniki procesu oraz interakcję człowiek-maszyna [15]

posuwu, są zapisane – zależnie od kinematyki procesu – w rejestrowanych przebiegach składowych siły skrawania i/lub momentu skrawania [4].

Na uwagę zasługuje również koncepcja „obrabiarki 4.0” odwołująca się do technologii wspomagających, takich jak systemy cyberfizyczne (*cyber-physical systems*) oraz internet rzeczy (IoT – *Internet of Things*) [7, 13]. Podstawowym zadaniem jest w tym przypadku integracja obrabiarek oraz urządzeń w hali produkcyjnej poprzez ich wzajemne skomunikowanie w celu ułatwienia monitorowania, planowania i inteligentnego sterowania procesami wytwórczymi [2, 13].

Doskonalenie (responsywność) interfejsu między IMT i operatorem

Jednym z kluczowych zagadnień w projektowaniu inteligentnych obrabiarek CNC jest projektowanie

interfejsów z uwzględnieniem optymalnej interakcji pomiędzy operatorem a interfejsem obrabiarki (*human-machine interaction*). Takie podejście powinno uwzględniać nie tylko projektowanie nastawione na optymalizację doświadczenia użytkownika w trakcie pracy z systemem (*user experience design – UXD*), ale również dane okulograficzne pozwalające określić, które elementy interfejsu są najczęściej używane przez operatora. Dodatkowo badania behawioralne mogą pozwolić na projektowanie interfejsu oraz całości obrabiarki w sposób uwzględniający potrzeby użytkownika końcowego.

Studium przypadku oparte na koncepcji przedstawionej na rys. 9, opublikowane w [15], wykazało, że operator spędza znaczną część całkowitego czasu obróbki na doskonaleniu interakcji z interfejsem obrabiarki. Udział ten zmniejsza się w miarę wzrostu doświadczenia operatora, jednakże nadal pozostaje

znaczący, co otwiera dalsze możliwości poprawy produktywności obrabiarki. Podstawowy kierunek doskonalenia interfejsu inteligentnych obrabiarek CNC sprowadza się do ich nastawienia na bardziej intuicyjną obsługę. Obecnie prowadzone badania koncentrują się na analizie danych okulograficznych pozyskanych od kilku operatorów o różnych długościach stażu zawodowego w celu zebrania danych wejściowych do optymalizacji interfejsów inteligentnych obrabiarek CNC.

LITERATURA

- [1] Moriwaki T., Shirase K. „Intelligent machine tools – current status and future direction”. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*. 9, 3/4 (2006): 204–218, <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2006.010055>.
- [2] Zalewski A., Grzesik W., Deja M., Jarosz K., Ruszaj A. „Podstawy funkcjonowania i programowania obrabiarek CNC. Procesy ubytkowe, przyrostowe i hybrydowe”. Warszawa: PWN (2024 w druku).
- [3] Lou P., Liu S., Hu J., Li R., Xia Z., Yan J. “Intelligent machine tool based on edge-cloud collaboration”. *IEEE Access*. 8 (2020): 139953–139965, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012829>.
- [4] Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: PWN (2018).
- [5] Yamato S., Sencer B., Beaucamp A. “Tool path planning and feed scheduling for time dependent processes”. Tollo T. (ed.). *CIRP novel topics in production engineering*: 1 (2024): 185–231.
- [6] Witt M., Schumann M., Klimant P. “Real-time machine simulation using cutting force calculation based on a voxel material removal model”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 105 (2019): 2321–2328, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04418-2>.
- [7] Grzesik W. „Digital twin in manufacturing. Part I. State of the art, architecture and applications”/„Cyfrowy bliźniak w procesach wytwórczych. Część I. Stan zagadnienia, architektura i zastosowania”. *Mechanik*. 1 (2023): 8–13, <https://doi.org/10.17814/mechanik.2023.1.1>.
- [8] Jarosz K., Özel T. “Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems”. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 15, 2–3 (2022): 127–148, <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2022.124922>.
- [9] SINUMERIK. Inteligentne rozwiązania dla obrabiarek, www.siemens.pl/sinumerik.
- [10] Jeon B., Yoon J.S., Um J., Suh S.H. “The architecture development of Industry 4.0 compliant smart machine tool system (SMTS)”. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 31, 8 (2020): 1837–1859, <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01539-4>.
- [11] “STEP/STEP-NC as a Solution for Data Interoperability in the CAx Chain”, <https://ukdiss.com/examples/step-step-nc-data-interoperability-cax-chain.php>.
- [12] Zhang Y., Yu X., Sun J., Zhang Y., Xu X., Gong Y. (2022). “Intelligent STEP-NC-compliant setup planning method”. *Journal of Manufacturing Systems*, 62 (2022): 62–75, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.11.002>.
- [13] Liu C., Xu X. “Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0”. *Procedia CIRP*. 63 (2017): 70–75, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.078>.
- [14] Grzesik W., Żak K., Tomkiewicz-Zawada A. „Analiza i modelowanie powierzchni w obróbce ubytkowej”. Warszawa: PWN (2023).
- [15] Jarosz K., Yan-Ting Chen Y.-T., Liu R. “Investigating the differences in human behavior between conventional machining and CNC machining for future workforce development: A case study”. *Journal of Manufacturing Processes*. 96 (2023): 176–192, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.04.037>. ■