

NC programok kiterjesztett számítógépes szimulációja

Extended Simulation of NC Part Program With Computer Tools

Erdélyi Ferenc, Hornyák Olivér

egy. docens egy. tanársegéd

Miskolci Egyetem, Informatikai Intézet, Alkalmazott Informatikai Tanszék

Abstract A modern számítógépes gyártásirányítás (MES) növeli a rugalmas termelés menedzsment lehetőségeit a robusztus, alternatívákat is tartalmazó technológiai tervek alkalmazására. Megfelelően gyors és megbízható döntéseket azonban csak a tervezés során előkészített alternatívák alapján lehet hozni. Ez szükségessé teszi a számítógépes NC programtervezés és szimuláció szolgáltatásainak fejlesztését. A cikk foglalkozik a forgácsolás komplex szimulációja modellezési problémáival, és összefoglalja az esztergálás technológiai modelljének összefüggéseit. Rámutat, a mesterséges intelligencia módszerek és az objektum orientált modellezés előnyeire a problémák megoldásában.

1. BEVEZETÉS

A gépgyártásban a fém alkatrészek közel 80 százaléka ma is forgácsolással készül. Ennek legfontosabb oka, hogy a forgácsoló szerszám egyszerű, az alakképzés folyamata a szerszámgépen, modell alapján, mozgásleképzéssel vezérelhető. A forgácsolással elérhető geometriai pontossággal és alakhűséggel más technológiák gyakran nem versenyképesek. A forgácsolás hatékonysága az utóbbi években is jelentősen fejlődött. A fejlődés fő jellemzői:

- Az CNC vezérléstechnika szolgáltatásainak további fejlődése.
- A nagy műveleti koncentráció, a megmunkáló központok elvének térnyerése.
- A szerszámanyagok forgácsoló képességeinek növekedése.
- Az automatizált és rugalmas gyártócellák, gyártórendszerek (FMS) elterjedése.

A forgácsolási technológiát alkalmazó cégek igénye, hogy a forgácsolási műveletek tervezése és irányítása még hatékonyabb legyen. A cégek törekvése:

- Bonyolult, szoborszerű felületek megmunkálhatósága.
- Az automatizált NC megmunkáló központok kihasználásának növelése.
- A műveleti idők további csökkentése, a termelékenység növelése.
- A műveletek várható minőségének, pontosságának növelése.

A forgácsolási műveletek tervezésénél növekvő igény van:

- A tervezési folyamat számítógépes támogatására (CAPP, NCP, CAD/CAM).
- A folyamat megbízhatóbb modellezésére, műveletelemek optimalizálására.
- A műveleti költségek, idők, erőforrás (szerszám) felhasználás pontosabb becslésére.
- A minőség, pontosság, selejtarány kockázat megbízhatóbb becslésére.
- Alternatív, (végeredmény invariáns) technológiai tervek létrehozására.

A számjegyvezérlésű gépek programtervezésénél a számítógépes támogatás a kulcseleme a fenti igények kielégítésének. Az NCP, CAD/CAM rendszerek a CAPP alkalmazások leggyakrabban használt eszközei. Az NCP rendszerek legfontosabb hagyományos funkciója a szerszámok programozott pontja pályájának megtervezése és transzformálása NC program-kód formájába. Ennek végrehajtása az NC gépen (szabályozott pozicionálással) a kívánt munkadarab alakot adja. A ma használatos NC programtervező alkalmazások többségének van beágyazott szimulátora, amely azonban legtöbbször csak szintaktikai ellenőrzést végez, és a megmunkálás geometriai modelljét állítja elő, illetve ehhez kapcsolódva képes szolgáltatásokra (pl. szerszámütközés vagy interferencia felismerése, pályabejárési idők becslése, stb). A forgácsolási folyamat fizikájának megbízható modellezése rendszerint hiányzik a szolgáltatások közül, így számos, a termelés hatékonyságát jellemző műszaki-gazdasági mutató előre nem becsülhető.

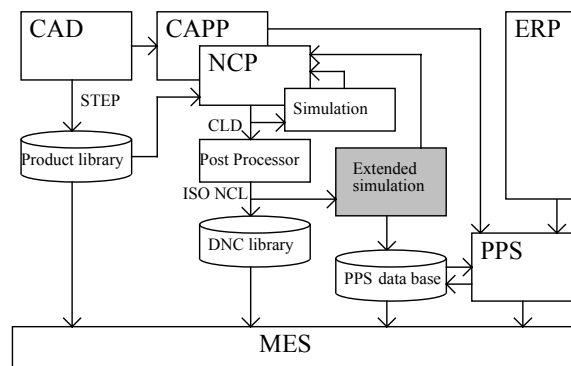
A problémák gyökere a forgácsleválasztási folyamat extrém bonyolultságában van. [1] A forgácsolás elmélete már az 1930-as évek óta kutatja a forgácsolási modellek területét és jelentős eredményeket ért el. Az 1970-es évektől főként a nagy szerszámgyártó cégek használták fel a kutatási eredményeket, alkalmazási kézikönyvek illetve újabban elektronikus adatbázisok formájában. Meglepő, hogy még a legnépszerűbb NCP alkalmazások is milyen kevéssé építenek a

folyamatok fizikai modellezésére. Az ipari gyakorlatban, az elméleti eredmények felhasználása csak lassan terjed. Továbbra is jelentős szerepe van az adott gyártási környezet viszonyait jól ismerő technológusok és gépkezelők tapasztalatainak és heurisztikus döntéseinek.

2. A TERVEZÉS ÉS VÉGREHAJTÁS INTEGRÁCIÓJA (CIM)

A technológiai tervezés (CAPP) a termelés tervezés (PPS) és a gyártásirányítás (MES) sikeres integrációjának esélyei ma igen kedvezőek, tekintettel a számítógépes hálózatok (LAN) fejlődésére. A három funkcionális területen használt alkalmazások azonban - a hálózati lehetőségek ellenére - számos esetben nem nyújtanak elegendő szolgáltatást a bevezetőben felsorolt igényekhez kapcsolódó feladatok megoldására.

A MES szintjén a gyártásirányítás sikerességének megítélésére általában több különböző kritérium is használatos. Ilyenek: 1. Gyártási költségek. 2. Átfutási idők. 3. Szállítókészség. 4. Folyamatban lévő munkák mennyisége (*WIP level*). 5. Erőforrások kihasználtsága. 6. Selejtarány. 7. Rugalmasság (átállíthatóság rendelés vagy erőforrás státus változása miatt). A MES szintű újraütemezés dinamikus feladat, amely döntéstámogatáson kívül a beavatkozási terület-bővítését is igényli.



1. ábra. A kiterjesztett szimuláció szerepe a CIM-ben

Ilyen tipikus MES feladat pl. a következő. Egy termék szerelésénél kiderül, hogy egyes rendelések prioritása üzleti okok miatt megváltozott. Új határidők keletkeznek, amelyek azonban csak akkor tarthatók, ha egyes hiányzó alkatrészcsoportok a szokásosnál gyorsabban legyárthatók vagy beszerezhetők. A MES szintjén ezt a feladatot „make or buy” döntéssel, a munkák újraütemezésével, kapacitások felszabadításával, a sorozatok megbontásával lehet megoldani. Lényegesen javítaná az újraütemezés sikerének esélyeit, ha pontosan ismertek lennének azok a határok, amelyek a forgácsolási műveletek átfutási idejét csökkenthetik, változatlan minőségi színvonalon, de kissé növekvő szerszámfelhasználással esetleg némileg nagyobb selejtkockázattal. Ez operatíván és hatékonyan megvalósítható, ha alternatív NC programok vannak a DNC archív könyvtárakban, amelyek szimulátorral ki vannak próbálva, azonnal letölthetők és felhasználhatók. Ilyen alternatívákat azonban csak megbízható műszaki-gazdasági modellek alapján lehet készíteni.

A robusztus és alternatív technológiai tervek MES szintű felhasználásának célja a gyártásirányítás rugalmasságának növelése. Gyakorlati tapasztalat, hogy a termelésirányítás leggyakoribb célfüggvénye, a készletszint, gépkivétel és a szállítókészség optimalizálása közül leggyakrabban a szállítókészség, azaz a határidők betartása játssza a főszerepet. Ezt a mutatót elsősorban az elindított sorozatok átfutási ideje határozza meg. Ezt gyakran csak korlátozottan lehet befolyásolni az ütemezés dinamikájával. A műveleti idők ellenőrzött módosítása csak akkor lehet sikeres, ha a műveletek alternatívái előre megtervezettek. Az alternatív megoldások szintézise számítógépes modellezést és szimulációt igényel. A szimulációnak ki kell terjedni a műveletek technikai, geometriai aspektusán túl az erőforrások felhasználására és a teljesítés minőségére is.

3. A FORGÁCSOLÁS MŰSZAKI GAZDASÁGI MODELLEZÉSE

A forgácsoló műveletek műszaki-gazdasági modellezésének jelentőségét mutatja, hogy a CIRP 1997-ben munkacsoportot hozott létre „Modelling of Machining Operations” néven, amely 1998-ban [1] átfogó jelentésbe tette közzé áttekintő értékelést és ez a téma a CIRP 1998-as Konferencián Keynote Paper-ként szerepelt. A Miskolci Egyetem Alkalmazott Informatikai Tanszéke három témakörben is végez évek óta kutatásokat, amelyek a forgácsolás általános és specifikus modellezését érintik. Ezek a következők:

1. Folyamat-felügyeleti feladatok megoldása forgácsoló szerszámgépeken AI eszközök felhasználásával.
2. A forgácsolási adatok optimalása a forgácsolási intenzitás (Q , cm^3/min) állapotjelzőjének felhasználásával.
3. A CAPP-PPS-MES integráció feladatainak megoldása csoporttechnológiai módszerekkel.
4. A valósidejű gyártásirányítás (MES) funkciók bővítése a robusztus és alternatív technológiai tervek alkalmazásával.

A forgácsolási műveletek szimulációjánál alkalmazható modellek lehetséges 6 absztrakciós szintje a következő:

1. fizikai (physical) szint
2. műveletelem (element)szint
3. alaksajátosság (feature)szint
4. művelet (operation) szint
5. munka (job) szint
6. rendelés (order) szint.

Az első három modellezési szinten a technológia fizikai folyamatai, a folytonos állapotjelző játsszák a fő szerepet. Itt tehát olyan modellekre van szükség, amely az anyagleválasztás geometriai, kinematikai, dinamikai, fizikai tulajdonságait prezentálja. (Nem foglalkozunk itt most a második három szint modelljeivel, amelyek a eseményvezérelt diszkrét dinamikus modellezés (EDDM) hatáskörébe tartoznak.)

A forgácsolás elmélet, a technológiai tervezés elmélete, valamint a számítógépes NC programozás által kidolgozott eljárások alkalmasak a modellezési feladatok egy részének megoldására. Ezek geometriai és fizikai modellek. A hagyományos megoldások azonban nem támogatják a forgácsolási műveletek műszaki-gazdasági modellezését és szimulációját. A nehézségek okai a következők:

- A modelleknek nagyszámú be-, ki- és belső változót kell kezelni.
- A változók közötti kapcsolatokra számos esetben nincs megbízható elméleti eredmény.
- Az anyagtulajdonságok figyelembevétele igen nehéz, csak empiriával lehetséges.
- A részfolyamatok között néhány, csak sztochasztikus változókkal írható le.

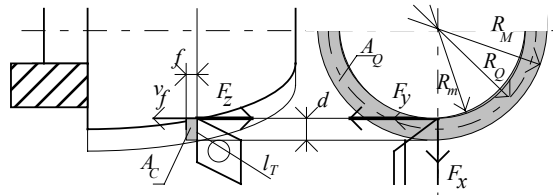
A nehézségek áthidalására a számítógépes modellezés általános sikeres módszerei nyújtanak reményt. Ilyen módszerek a következők:

1. Az objektum orientált modellezés következetes alkalmazása.
2. MI módszerek alkalmazása a nemlinearitások kezelésére.
3. Az állapotegyenletek használata a dinamikus folyamatleírásra.
4. A komponensekre épített szoftverfejlesztés;
5. A grafikus szemléltetés és az interaktív ember-gép együttműködés kihasználása.

A komplex szemléletnél a modellezési absztrakciós szintek között kiemelkedő szerep jut az alaksajátosság szintnek. Ezen a szinten lehet a legnagyobb valószínűséggel olyan modellt konstruálni, amely egyfelől kihasználja a fent felsorolt számítógépes technológiai előnyöket, másrészt lehetővé teszi az alacsonyabb és a magasabb szinteknek megfelelő modellek felépítését.

4. AZ ESZTERGÁLÁS MŰVELETELEM SZINTŰ MODELLJE

Az esztergálás műveletelem szintű modelljét, amely alkalmas folyamat menedzselési döntések támogatására is, a következőképpen foglalhatjuk össze. (2. ábra).



2. ábra. Az esztergálás geometriai modellje

Geometriai viszonyok.

$D_m(t)$ a szerszám származtató felülete által súrolt pillanatnyi legkisebb átmérő.

$D_M(t)$ az aktuális anyaghatároknak megfelelő pillanatnyi legnagyobb átmérő. Munkadarab geometria függő. A szimulátor számítja.

$D_Q(t) = \frac{1}{2} \cdot (D_M + D_m)$ az esztergálási közép átmérő.

$d(t) = \frac{1}{2} \cdot (D_M - D_m)$ a pillanatnyi fogásmélység. A szimulátor számítja.

$A_Q(t) = D_Q \cdot \pi \cdot d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_M^2 - D_m^2)$ az aktuális hatás-keresztmetszet.

$f(t) = \frac{v_f}{n}$ [mm/fordulat] a pillanatnyi főorsó fordulatra eső előtolás

$A_c(t) = d(t) \cdot f(t)$ [mm²] a pillanatnyi forgácskeresztmetszet

$l_T(t)$ a pillanatnyi, fogásban lévő szerszám élhossz (szerszámgeometria függő)

$h_c(t) = \frac{A_c}{l_T}$ a pillanatnyi (az él mentén átlagos) forgácsvastagság.

Kinematikai viszonyok:

n [fordulat/min] a pillanatnyi főorsó fordulatszám.

$v_f = n \cdot f$ [mm/min] a pillanatnyi előtoló sebesség. f : a fordulatonkénti előtolás.

$v = D_Q \cdot \pi \cdot n$ [m/min] a pillanatnyi közepes forgácsolási sebesség.

$Q = A_Q \cdot v_f = D_Q \cdot \pi \cdot d \cdot v_f = D_Q \cdot \pi \cdot d \cdot n \cdot f = v \cdot f \cdot d$. [cm³/min] a pillanatnyi anyag-leválasztási intenzitás (*Material Removal Rate*, MRR).

Dinamikai viszonyok:

$F_y(t) = k_q(h_m, \text{mdb. anyagkód}) \cdot A_c(t)$ [N] (Itt k_q a fajlagos forgácsoló erő), vagy:

$F_y(t) = C_F(\text{mdb. anyagkód}) \cdot v^{y_F} \cdot f^{x_F} \cdot d \cdot \prod_i K_i$ A pillanatnyi forgácsoló erő.

Itt K_i korrekciós tényezők, a hűtés, a nyersdarab, a befogás minőségének leírására.

$F_x = \lambda_x(\text{élszögek}) \cdot F_y$ [N] A pillanatnyi fogásvétel irányú erő. Szerszám geometria függő.

$F_z = \lambda_z(\text{élszögek}) \cdot F_y$ [N] A pillanatnyi előtolás irányú erő. Szerszám geometria függő

$M(t) = \frac{1}{2} D_Q \cdot F_y \cdot 10^{-3}$ [Nm] A pillanatnyi forgácsoló nyomaték.

$P(t) = M \cdot \frac{2\pi}{60} n$ [Nm/sec] A pillanatnyi forgácsolási teljesítmény.

A technológiai viszonyok

A technológiai viszonyok modellezésére csak empiria áll rendelkezésre. A legfontosabb technológiai állapotjelző a szerszám éltartama. Stacionárius forgácsolás esetén modellezésre a

Taylor egyenlet a legalkalmasabb, ha a forgácsolási adatok bizonyos határok között vannak. Nem stacionárius forgácsolás esetén a kísérleti tapasztalatok szerint egy terhelésfüggő lineáris modell is használható. Ez a modell a szerszámnyagtól és a terheléstől függő kopási sebességet (v_Δ) használ állapotjelzőként. A szerszám terhelés jellemzésére a bevonatos lapkánál az $L_T = f \cdot v^q$ állapotjelző használható. A modell szerint:

$$v_\Delta = k_\Delta (\text{szm. anyagkód}) \cdot L_T [\text{mm/min}] \quad \text{Itt } q = 1/m \approx 4 \quad k_\Delta = 1/C_v^q$$

$$u_\Delta(i) = u_{\Delta 0} + \int_0^t v_\Delta(t) dt, \quad 0 \leq u_\Delta \leq 1, \quad u_\Delta(t) = \frac{\Delta(t)}{\Delta_{ref}}, \quad T^m = \frac{C_v}{d^{x_v} f^{y_v} v} = \frac{R}{Q} t_H^m$$

A modell a halmozódó kopás feltételezését használja, és stacionér esetben a Taylor összefüggést adja. Ez a modell statisztikus modellezésre is alkalmas, ha k_Δ valószínűségi változó exponenciális (vagy más) eloszlással. A technológiai viszonyok modellezésére szolgál az öngerjesztett rezgési hajlam becslése. Az öngerjesztési állapot a munkadarab és a szerszámgeometria mellett a gép-befogó-munkadarab-szerszám rugalmas mechanikai rendszer tulajdonságaitól függ. Itt a modellezés számára három út járható.

1. Mérési adatok alapján szimulációs időben működő dinamikai modell felépítése.
2. Stabilitási kártya leképzése a modellbe.
3. Neurális háló használata a hajlam becslésére.

A felhasznált forgácsolási energia a forgácsoló erő modellje segítségével:

$$E_c(t_c) = \int_0^{t_c} P(t) dt \quad \text{ahol } t_c = \int_0^{s_s} \frac{ds}{v_f(ds)}, \text{ a forgácsolási főidő.}$$

Itt ds szerszám-pálya elemi ívhossza.

Az \bar{R}_a : várható közepes felületi érdesség, $\bar{\delta}_m$: a várható átlagos méretpontosság, $\bar{\delta}_a$ a várható átlagos alakhúság, p_s : a várható selejtarány modellezése nagyon nehéz. Létező gépek esetén, mérések mintái alapján MI módszerekkel, neurális hálóval van esély modellezésre.

A műszaki-gazdasági viszonyok modellje.

Az esztergálási folyamat értékeléséhez nélkülözhetetlenek a műszaki –gazdasági állapotjelzők és ezek integrált, vagy átlagos értékei.

A műveletlem várható forgácsolási ideje $t_m = t_c + t_r + t_i$, ahol t_r : a gyorsmenettel megtett utakhoz szükséges idő, és t_i az előtolás nélkül felhasznált idő (Pl. szerszám váltás és szerszámcsere idő). A műveletlem ideje az NC program, tehát a geometriai modell alapján nagyon pontosan számítható.

A műveletlem várható költsége csak az adott környezet (cég) érvényes adatainak és konvencióinak figyelembevételével számítható. A műveletlem szinten használható modell:

$K_\Sigma = K_m + K_t = k_w \cdot t_m + \frac{t_m}{T} (k_w \cdot t_{cs} + K_T)$ ahol: k_w : a munkahely percköltsége, K_T : az egy cserére jutó szerszámköltség, t_{cs} : a szerszám csere idő, K_t : A műveletlemre jutó szerszámköltség.

$$\text{A műveletlem átlagos anyagleválasztási intenzitása: } \bar{Q} = \frac{V}{t_c}$$

Az érvényes technológiai korlátok ismeretében a műveletlem valamilyen értelemben optimális intenzitása illetve optimális technológiai adatai számíthatók. A Tóth T. professzor által kidolgozott modell szerint:

A műveletlemre az átlagos, fajlagos, költség-ekvivalens mutató az átlagos anyagleválasztási intenzitás (\bar{Q}) és egy komplex, szerszámköltség mutató (R) függvénye.

$$\tau = \frac{K}{V \cdot k_w} = \frac{1}{\bar{Q}} + \frac{\bar{Q}^{q-1}}{R^q}. \quad \text{Itt: } R = \frac{d^{1-y_v} \cdot f^{1-y_v} C_v}{t_H^m} = \frac{Q \cdot T^m}{t_H^m}, \quad \text{és} \quad t_H = \frac{K_t}{k_w} + t_{cs}$$

A költség-optimalis intenzitás, ha a fogásmélység állandó és az erő (előtolás) korlát (R_M) van érvényben:

$$Q^* = \frac{R_M}{(q-1)^m}, \quad \eta = \frac{\bar{Q}}{Q^*}, \quad Q_m \leq \bar{Q} \leq Q_M$$

Az eredmény összevethető a műveletelem tényleges (az NC program alapváltozatában kódolt) átlagos \bar{Q} intenzitásával. Itt a maximális intenzitás abból a feltételből számítható, hogy az aktuális szerszám éltartama nem csökkenhet a műveletelem forgácsolási főideje alá. Szerszámköltség megtakarítás céljából az intenzitás csökkenthető, ha a gép kapacitása egyébként sincs leterhelve. A Q_m minimális intenzitás ilyenkor τ értékének tapasztalatilag elfogadható maximumából adódik.

$$Q_M^{q-1} = R_M^q \cdot \frac{t_H}{V}, \quad Q_m \equiv \frac{1}{\tau_{Max}}, \quad t_{c,min} = \frac{V}{Q_M}, \quad \text{és} \quad t_{c,Max} = V \cdot \tau_{Max}$$

A Q határainak ismerete lehetővé teszi a költségtartalék aktuális és maximális értéke, a minimális műveletelem idő, az időtartalék, és a hozzátartozó intenzitás, valamint az éltartam szinkronizálás hatásfokának mérését. Ha az éltartam minimális értékét korlát feltételnek írjuk elő, vagy a gép teljesítménye korlátozott, akkor az aktuális \bar{Q} kódolt intenzitást $Q_{T,Max}$ és $Q_{P,Max}$ aktuális értékével is össze kell vetni. Ez a fent részletezett modell esetén már nem okoz gondot.

A modellezés magasabb szintjei irányában ez a modell jól aggregálható. Az aggregálás olyan komplex modell-funkció, amely az alacsonyabb szintű modell adataira építve állítja elő a magasabb szintű modell jellemzőit. A műveletelemek aggregálása idő és költség vonatkozásokban additív.

Az alacsonyabb szint modelljének irányában dekompozícióra van szükség. Mivel a modell belső kapcsolatai nemlineárisak, a dekompozíció körültekintést igényel.

A modell pontossága a nemlineáris részmodellek miatt csak konkrét esetekben becsülhető. Fontos szempont lehet a részmodellek kimenő jellemzőinek mérhetősége. A modell validálása végül csak laboratóriumi kísérletekkel végezhető el.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A modern termelésmenedzsment számára fontos eszköz lehet az NC programokba kódolt technológia variálása, alternatív NC programok alkalmazásával. Az NC programokba kódolt geometriai modellre alapozott kiterjesztett NC szimulátor döntéstámogató adatokat szolgáltat a termelésstervezés és a gyártásirányítás számára.

A kutatás a *Technológiai folyamatok objektum orientált modellezése* c. FKFP 0275 számú projekt támogatásával készült. A szerzők a támogatásért köszönetüket fejezik ki.

Irodalomjegyzék

- [1] Erdélyi F., Hornyák O: *Overwiev of the Possibilities of NC Simulation of CAM*. MicroCAD '01. International Conference, 2001. pp. 18-24.
- [2] Erdélyi F., Hornyák O.: *NC Program Simulation with the Capability of Generating Alternative Process Plan for Flexible Manufacturing*. 11th Prolamat 2001 Conference on Digital Enterprise, Budapest 2001 Nov. 7-10. Kluwer Academic Publishers, pp. 43-50.
- [3] van Lutterveit C A, Childs T H C, Jawahir I S, Klocke F, Venuvinod P K, : Present Situation and Future Trends in Modelling of Machining Operations. CIRP keynote papers. 1998. pp. 1-42.
- [4] El Maraghy H A: *Evolution and Future perspectives of CAPP*. Annals of the CIRP V42/2 1993. pp. 739-751.
- [5] Tóth T, Erdélyi F: *The Role of Optimization and Robustness in Planning and Control of Discrete Manufacturing Processes*. Proceeding of the 2nd World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems. June 10-13. 1997. Budapest, Hungary, Springer, pp. 205-210.
- [6] Tóth Tibor: *Tervezési elvek, modellek és módszerek a számítógéppel integrált gyártásban*. Tankönyv. Miskolci Egyetemi Kiadó 1988.