

# Simultan 5-Achs-Frässimulation zur Verifikation der Werkzeugbahn

Dipl.-Ing. Lee, Seok Won

## 1 Einleitung

NC-Fräsen ist einer der vorherrschenden Prozesse unter den Fertigungsverfahren. Um die Produktqualität zu sichern und Ausschuss zu vermeiden, z.B. infolge von Hinterschneidungen am Werkstück oder Kollision zwischen dem Werkzeug und den Maschinenkomponenten, ist es notwendig, vor der realen Bearbeitung den Bearbeitungsprozess zu simulieren [NN09]. Da das Time-To-Market in modernen Produktionszyklen immer kürzer wird, spielt die Verifikation von Fräsprozessen eine entscheidende Rolle in der Prozesskette der Produktherstellung.

## 2 Hüllvolumenberechnung

Im Rahmen eines abgeschlossenen Projektes<sup>4</sup> wurde eine neue Methode zur Ermittlung der Hüllvolumina mit Hilfe der Gauß-Abbildung vorgestellt [LEE07, LEE08, DOC83]. Hiermit werden zwei verschiedene Abbildungen, die von der Gauß-Abbildung abgeleitet sind, zur Berechnung der Hüllvolumen eingesetzt, und zwar die Kontakt- und Werkzeug-Abbildung.

Die Idee, die kritische Kurve zu finden beinhaltet, dass man die Probleme im euklidischem Raum nach der Gaußesche Sphäre mit Hilfe von Gaußesche Abbildung transformiert, das Problem in Gaußescher Sphäre löst und die Lösungen in euklidischem Raum durch inverse Gaußesche Abbildung zurückbekommt. Das Verfahren wird im Folgenden kurz beschrieben:

1. Zu Beginn wird der Flächennormalvektor  $N(\eta, \xi)$  von einem Werkzeug, das von  $\eta$  und  $\xi$  parametrisiert ist, durch Gl. (1) berechnet wobei  $P(\eta, \xi)$  eine Oberflächenbeschreibung der Werkzeugform ist. (s. Abbildung 1(a)).

$$N(\eta, \xi) = \frac{\frac{\partial P(\eta, \xi)}{\partial \eta} \times \frac{\partial P(\eta, \xi)}{\partial \xi}}{\left| \frac{\partial P(\eta, \xi)}{\partial \eta} \times \frac{\partial P(\eta, \xi)}{\partial \xi} \right|} \quad (1)$$

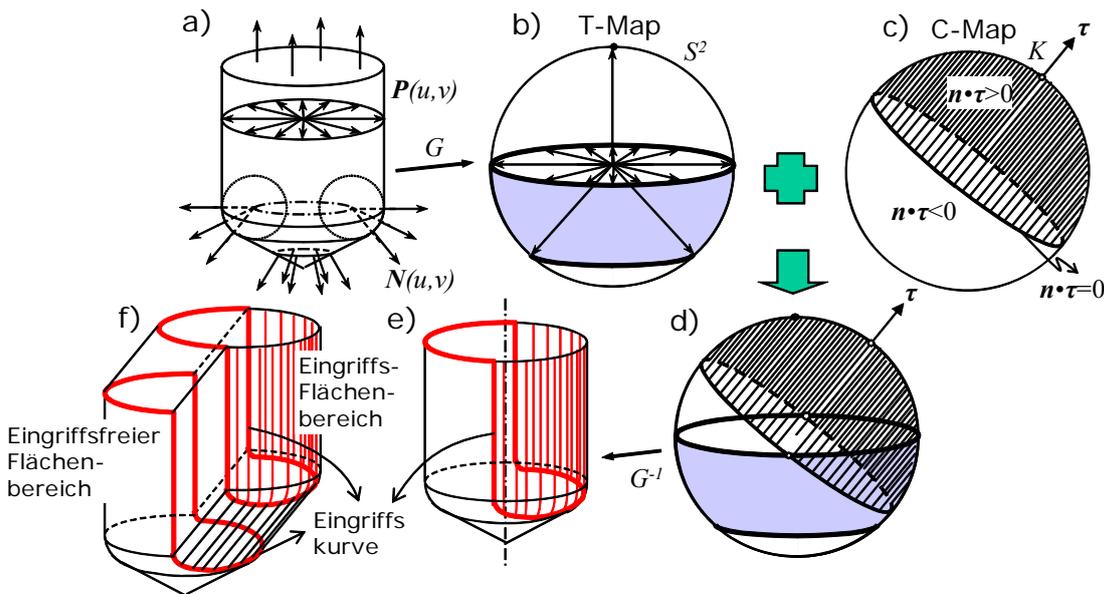
2. Ein Anfangspunkt von jedem Flächennormalvektor ist zum Ursprung der Einheitskugel verschoben so dass man die Werkzeug-Abbildung erhält (s. Abbildung 1(b)).

3. Der momentane Geschwindigkeitsvektor  $\tau$  am Werkzeug und dessen Kontakt-Abbildung auf einer Kugel  $K$  mit dem Radius  $r=1$ . Die Fläche auf der Kugel wird nach dem Skalarprodukt  $N \cdot \tau$  in 3 Subflächen unterteilt: Halbkugel für den Eingriffsflächenbereich ( $N \cdot \tau > 0$ ), Großkreis des Eingriffs ( $N \cdot \tau = 0$ ), Halbkugel für den eingriffsfreien Flächenbereich ( $N \cdot \tau < 0$ ), (s. Abbildung 1(c)).

4. Die Werkzeug- und Kontakt-Abbildung werden so überlappt dass der Ursprung von beiden Abbildung zusammenfällt. Dann teilt die Kontakt-Abbildung die Werkzeug-Abbildung in drei Regionen ein (s. Abbildung 1(d)).

---

<sup>4</sup> Arbeitspaket im AIF-Projekt „Strategie zur flexiblen Fortführung der Bearbeitung nach intra-operationeller Unterbrechung des NC-Fräsens, basierend auf STEP-NC-Informationen“ 2007-2009



**Abbildung 1.** Hüllvolumen der 3-achs-bewegenden Werkzeuge

5. Durch Überlappung werden die Eingriffskurve und der Eingriffs- und eingriffsfreie Flächenbereich auf der Werkzeugoberfläche getrennt. Damit kann das Eingriffsverhalten veranschaulicht werden. (s. Abbildung 1(e)).

6. Die Oberfläche des Hüllvolumen wird erzeugt wenn der eingriffsfreie Bereich des Werkzeuges an der Ausgangslage, der Eingriffsbereich an der Endposition und der überstrichenen Region, wo die kritischen Kurven linear interpoliert sind, zusammengefügt wird. (s. Abbildung 1(f)).

### 3 Berechnung des verbleibenden Materials

Es ist erforderlich, das Hüllvolumen (HV) des Werkzeuges in der Simulation kontinuierlich vom Rohteil zu subtrahieren um Werkzeugwege zu überprüfen, da das Fräsen der materielle Beseitigungsprozess mit einem Geometrie-definierten Zerspanwerkzeug ist. Dazu wurden Methoden zur Materialabtragsimulation [ERL09] weiter erforscht und entwickelt.

Es gibt eine Fülle von mathematischen Ansätzen HV zu berechnen und auf dieser Basis aus der Relativbewegung erzeugte Volumen für das NC-Fräsen zu überprüfen. Diese können grob in drei Kategorien zur mathematischen Beschreibung und praktischen Umsetzungen eingeteilt werden: linienbasierte (1 D), flächenbasierte (2 D) und volumenbasierte (3 D) Methoden.

Die volumenbasierte Methode basiert auf der Constructive Solid Geometry (CSG) [Kaw91]. Der Ansatz ermöglicht die Richtigkeit des geometrischen Ausdrucks und die Robustheit der Boolesche Operation, die die Fräsvorgänge simuliert.

Zweitens basiert die flächenbasierte Methode auf der Oberflächendarstellung Boundary Representation (Brep) und hat die Aufgabe, die Oberflächen der HV zu finden. Die Kernfragen sind, wie man Flächen findet, die zur Hüllfläche gehören, die von den aufeinander gelegten Eingriffskurven eines Werkzeuges bedeckt sind. Letztendlich wird die Oberfläche des HV als eine polygonale Annäherung durch Interpolation der Gruppe von Eingriffskurven erzeugt. In diese Kategorie der Oberflächenerzeugung fallen z.B. die Prinzipien „envelope theory“ [WANG86], Sweep Envelope Differential Equation (SEDE) [BLA97] und Imprint-Methode [ROT01].

Um die Komplexität während der booleschen Operation zu überwinden, wurden linienbasierte Methoden von vielen Forschern entwickelt und eingeführt. Zum Beispiel werden Z-map [CHUN98], Dixel [HUI94], „Rasenmäher“-Methode [JERA89] in diese Kategorie klassifiziert. Die Hauptidee hinter der linienbasierten Methode ist, die Schnittpunkte zwischen Strahlen und Werkzeugkörper zu finden. Daher wird die Komplexität boolescher Operation von 3D zu 1D Berechnung reduziert. Die größten Nachteile sind allerdings die unvermeidliche grobe Geometrieannäherung bei besonders großen Bauteilen, wie sie z.B. im Formen- und Werkzeugbau typisch sind. Weiterhin erzeugt der Algorithmus eine graphische Mehrdeutigkeit, wenn Schnittpunkte zwischen den Strahlen und dem Werkzeug zu finden sind, die fast parallel zum Werkstück liegen.

### **3.1 Simultan 5-Achs-Maschinensimulation**

Ein 3- und simultan 5-Achs-Simulator wurde nach DIN 66035 unter Beachtung einer Maschinenkinematik entwickelt. Damit wird es möglich, ein NC-Programm vor der Durchführung der Fertigung mit hoher Genauigkeit grafisch zu überprüfen.

Der Simulator wird in der Entwicklungsumgebung Microsoft Visual C++ 6.0 und mit OpenCascade V5.1 entworfen. Die realisierten Module sind Einlesen, Visualisierung von Maschine, Werkstück und Werkzeug sowie die Simulation der Bearbeitung. Intern wird die kinematische Kette der Werkzeugmaschine, ausgehend von Daten des G-Codes ermittelt und aktualisiert.

Der Simulator bildet z.Zt. Maschinenkinematiken wie DMG MAHO 800C nach Drehtisch-Schwenkkopf-Kinematik und Ingersoll OPS 650 nach Doppeldrehtisch-Kinematik ab. Der Simulator liest das vom Programmiersystem GIBcam ausgegebene NC-Programm (G-Code) ein und simuliert den Fertigungsablauf.

Für die weitere Entwicklung ist es sinnvoll, wenn die Lage des Werkzeuges möglicherweise durch Simulation hinsichtlich der Maschinenkinematik und des Arbeitsraums bestimmt werden kann. Die Fertigungssimulation auf der Basis von booleschen Operationen (s. Abbildung 4) soll in Zukunft weiter realisiert werden.

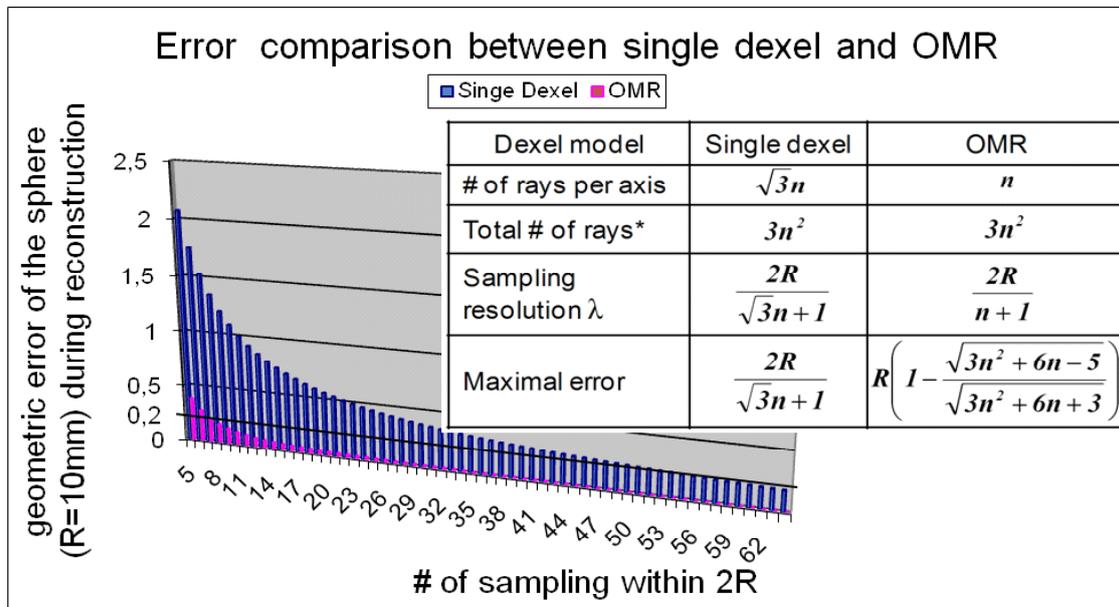
### **3.2 Orthogonales Multi-Strahl-Modell**

Um das aktuelle Werkstück zu simulieren, muss das Hüllvolumen des Werkzeuges erzeugt und vom aktuellen Werkstück an jedem Bearbeitungsschritt (G-Code-Block) subtrahiert werden. Die boolesche Subtraktion kann mit unterschiedlichen Methoden realisiert werden. So nutzte z.B. [VANH86] in seiner Arbeit ein Dixel-Modell, das ein Tiefen-Element darstellt. Das Dixel-Modell hat mehrere Vorteile. Durch die Reduktion der booleschen Operation vom 3- auf den 1-dimensionalen Raum arbeitet der Algorithmus schnell und genau.

Auf der anderen Seite hat das Modell den entscheidenden Nachteil, das nur ein momentanes Abbild der aktuellen Bearbeitungssituation (Image) erzeugt wird. Es ist nicht möglich das zweidimensionale Simulationsmodell zu manipulieren (Bewegung, Rotation, Zoom). Eine Änderung der Blickrichtung erfordert eine Neuberechnung der aktuellen Bearbeitungssituation.

Deswegen kann die simulierte Geometrie nicht gespeichert werden wie ein geometrisches Modell für eine spätere Nutzung z.B. in einem CAD oder CAM-System. Zudem ist es schwierig, einen Schnittpunkt der Werkstückoberfläche mit einem Strahl (Dixel) zu berechnen, der quasi-parallel zur Werkstückoberfläche verläuft.

Aus diesem Grund wurde ein orthogonales Multi-Dexel-Modell (OMR) entwickelt, um die oben genannten Nachteile zu vermeiden. Das OMR nutzt drei zweidimensionale Reihen (Gitter) von jeweils nach x, y und z ausgerichteten Strahlen. Das OMR ist eine erweiterte Version der bisher in der Literatur vorgestellten 1D-Dexel-Modelle ([BM97], [MSSA03]). Mit dem OMR kann eine Oberfläche genauer als mit dem 1D-Dexel-Modell rekonstruiert werden. In der Abbildung 2 wird das OMR mit einem ausgewählten 1D-Dexel-Modell verglichen. Diese Abbildung zeigt den maximalen Fehler für beide Modelle, wenn eine Kugel mit Radius  $R=10\text{mm}$  rekonstruiert wird.



**Abbildung 2.** Fehlervergleiche zwischen Ein- und Multi-Dexelmodell

Das impliziert, dass das OMR im Vergleich zum 1D-Dexel-Modell bei vorgegebenen maximalen geometrischen Fehler eine wesentlich geringere Anzahl an Strahlen benötigt. Beispielsweise benötigt das OMR zur Realisierung eines maximalen geometrischen Fehlers von 0.2mm nur 147 (=3x7x7) Strahlen im Vergleich zu 2916 (=54x54) Strahlen bei Anwendung des 1D-Dexel-Modells.

### 3.3 Boolesche Operation

Beim Fräsen werden durch das Werkzeug vom Werkstück kontinuierlich Materialbestandteile in Form von Spänen getrennt. Die mathematische Formulierung dieses Prozesses (Wechselwirkung von Werkzeug und Werkstück) wird folgendermaßen beschrieben:

$$R = W - \left( \bigcup_{k=1}^{k=n} SV_k \right) = (((W - SV_1) - SV_2) - \dots) - SV_n \quad (2)$$

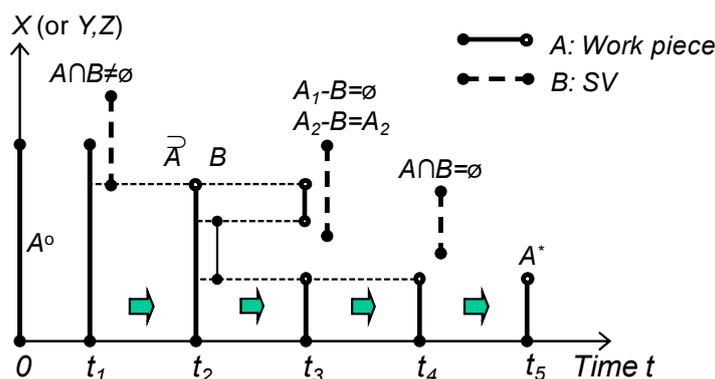
$$V \left( i - 1 + \frac{k}{n} \right) \quad (3)$$

$$TV(t) = X(t) \cdot TOOL_{local} \quad (4)$$

$X$  ist die Transformationsmatrix und  $TOOL_{local}$  bezeichnet das Zerspanwerkzeug, das im lokalen Koordinatensystem definiert ist. Das Hüllvolumen  $SV_i$  des Werkzeugs am  $i$ -ten Code-Block ist die vollständige Summierung vom momentanen Werkzeugvolumen  $TV$  innerhalb des normalisierten Zeitintervalls  $[0,1]$  (Gl. (3)). Anschließend ist das zu bearbeitende Werkstück  $R$  zu berechnen, entweder durch die Subtraktion des Rohteils  $W$  von der Summierung  $USV_k$  des Hüllvolumens oder durch die kontinuierliche Subtraktion des aktuellen Werkstückes vom jetzigen Hüllvolumen  $SV_i$  (Gl. (2)). Das Interesse ist die Grenzfläche  $\Phi R$  des In-Prozess-Werkstückes  $R$  zu finden, d. h. die Grenze  $\Phi SV_i$  jedes Hüllvolumens ist zu finden, um  $\Phi R$  zu aktualisieren.

$$\Phi SV_i = \Phi TV^-(i-1) + \lim_{n \rightarrow \infty} \bigcup_{k=0}^{k=n} \Lambda \left( TV \left( i-1 + \frac{k}{n} \right) \right) + \Phi TV^+(i), i \geq 1 \quad (5)$$

Die Oberfläche  $\Phi SV_i$  ist die Summe der Flächenanteile des Werkzeuges (Gl. (5)).  $\Phi TV$  und  $\Phi TV^+$  sind der Eintrittsbereich und Eintrittsfreie Bereich des Werkzeuges. Operator  $\Lambda$  ist verantwortlich dafür, die kritische Kurve zu finden, die auf den Oberflächen von momentanem  $TV$  und  $SV$  zur gleichen Zeit eingebettet ist.



**Abbildung 3.** Elementare logische Operationen pro Gitterpunkt

Das OMR wird zur Verwirklichung der Booleschen Operation benutzt. Durch dieses Modell kann die Boolesche Subtraktion von dem 3D geometrischen CSG zu 1D-numerischer Subtraktion für jede Achse vereinfacht werden, so dass die komplexe Berechnung vermieden wird. Abbildung 3 zeigt einfache logische Operationen des Dexcel-Modells. Das Hüllvolumen des Werkzeuges  $B$  wird vom Werkstück  $A$  pro Gitterpunkt subtrahiert.

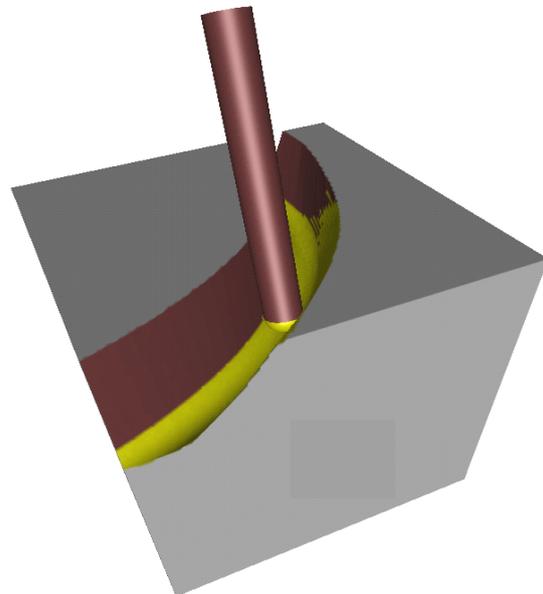
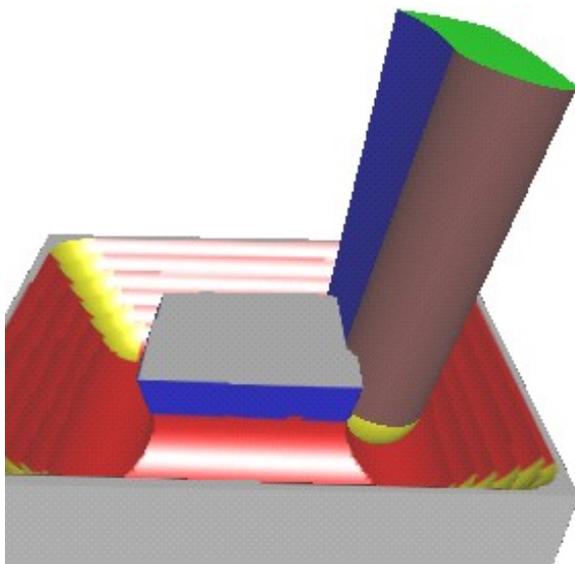
### 3.4 Implementierung und Ergebnisse

Der Algorithmus ist in C++, OpenGL V2.0 und Standard Template Library (STL) implementiert. Das Simulationssystem läuft auf Intel(R) Core2 Duo 2,33GHz und 2 GB RAM welcher mit dem Grafikbeschleuniger GeForce 8600 GT ausgestattet ist.

Die Implementierung der Hüllvolumenberechnung und des OMR-Modells wurde getestet. Dazu kam der offene Quellcode von [MÖL97] zum Testen der elementaren logischen Operationen zum Einsatz. Die erzielten Ergebnisse für ausgewählte Demonstrationswerkstücke sind in Abbildung 4 dargestellt.



(a) Vergleich real und virtuell gefräste Werkstücke



(b) Zerspannsituation beim Materialabtrag      (c) Verifikation für Zahnlückengeometrie

**Abbildung 4.** Ergebnisse der Materialabtragsimulation

Das Simulationssystem arbeitet die NC-Blöcke auf einem virtuellen Werkstück ab. Das dabei entstehende virtuelle Werkstück entspricht sehr gut dem realen auf der Maschine hergestellten Werkstück (s. Die Abbildung 4(a)).

Abbildung 4(b) zeigt die Volumenoperation zwischen Werkzeug und Werkstück mit  $100^3 \text{ mm}^3$ . Die Gitter sind entsprechend der jeweiligen Achse ausgerichtet. Dargestellt ist der Zwischenzustand nach mehreren Booleschen Differenzoperationen. Die Eingriffssituation des Werkzeuges ins Material ist gut zu erkennen.

Beispielhaft zeigt die Abbildung 4(c) die Möglichkeit, ein NC-Programm zur Zahnradfertigung zu verifizieren. Die Bahn für Zahnflächen, die von einem CAD-System modelliert sind, wurde von einem CAM-System generiert und durch den Simulator überprüft.

## 4 Zusammenfassung

Ein Zerspansimulationskern für mehrachsige Bearbeitungen wurde konzipiert und für unterschiedliche Aufgabenstellungen kontinuierlich weiterentwickelt. Dieser Kern basiert auf der exakten Hüllvolumenberechnung des im Raum bewegenden Werkzeuges und einem weiterentwickelten Dixelmodell, in dem der Zerspanvorgang virtuell repräsentiert und durchgeführt wird. Im Anwendungsfall des Projektes [LEE09a, LEE09b, AIF09] wurde das aus der Zerspansimulation berechnete aktualisierte Werkstück ins CAM-Modul eingelesen, wodurch die neue Bahn berechnet und die unterbrochene Bearbeitung fortgesetzt wird.

## Literatur

- [AIF09] Lee, S.W.; FlexMill - Intraoperationell, flexible Fortführung der Bearbeitung nach Unterbrechung des NC-FräSENS, Abschlussbericht, TU Dresden, 2009
- [BLA97] Blackmore et al.; Sweep-envelope differential equation algorithm and its application to NC machining verification, CAD, Vol. 29, pp. 629–637, 1997
- [BM97] Benouamer, M.O., Michelucci, D.; Bridging the gap between CSG and Brep via a triple ray representation; ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, Proceedings of the 4th ACM symposium on Solid modeling and applications, Atlanta, GA, pp.68-79, 1997
- [CHUN98] Chung et al.; Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC-verification, CAD, Vol. 30, pp. 587-593, 1998
- [DOC83] Do Carmo, M.; Differentialgeometrie von Kurven und Flächen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1983.
- [ERL09] Erler, M.: Entwicklung von Methoden zur Materialabtragsimulation des 5-Achsen-SimultanfräSENS. Großer Beleg, TU Dresden 2009
- [HUI94] Hui, K.; Solid sweeping in image space –application to NC simulation, The Visual Computer, Vol.10, pp. 306-316, 1994
- [JERA89] Jerard et al.; Approximate methods for simulation and verification of numerically controlled machining programs, The Visual Computer, Vol.5, pp.329-348, 1989
- [LEE07] Lee, S.-W.; „A Novel Approach to 5 Axis Milling Simulation Exploiting GPU and Swept Volume via Gauss Map“, XVI. Wissenschaftliches Symposium TU Liberec – TU Dresden, Liberec, Czech Republic, 5. September 2007
- [LEE08] Lee, S.-W., Nestler, A.; „5 Axis Milling Simulation using a Swept Volume via Gauss Map“, 16th WSCG International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Czech Republic, February 4-7, 2008.
- [LEE09a] Lee, S.-W.; Münzner, J.; Nestler, A.: FlexMill: Flexible machining system tackling abnormal process status using NC milling simulation. In: Gantar, C: 7th International Conference on Industrial Tools and Material Processing Technologies 2009, Ljubljana, Slovenia. October 4-7, 2009, Vol.7, pp. 237-244, Celje: TECOS, ISBN 978-961-6692-01-4
- [LEE09b] Nestler, A.; Lee, S.W. Strategie zur flexiblen Fortführung der spanenden Bearbeitung. VDI-Z Integrierte Produktion, November 2009, S. 55-58, ISSN 0042-1766
- [MÖL97] Möller, T., Trumbore, B.; Fast, minimum storage ray-triangle intersection. Journal of graphics tools, 2(1):21-28, 1997.
- [MSSA03] Müller, H., Surmann, T., Stautner, M., Albersmann, F., Weinert, K.; Online Sculpting and Visualization of Multi-Dixel Volumes; 8th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, Seattle, WA, pp.258-261, 2003
- [NN09] N.N.: 3D-Realsimulation für exakteres FräSEN. Presseinformation, VDI-Z 151 (2009), Nr.3, März, S. 42-43
- [ROT01] Roth et al.; Surface swept by a toroidal cutter during a 5-axis machining, CAD, Vol. 33, pp. 57-63, 2001
- [VANH86] van Hook, T.; Real time shaded NC milling Display; Dallas, August 18-22, SIGGRAPH '86, Volume 20, Number 4, 1986
- [WANG86] Wang et al.; Geometric modeling for swept volume of moving solids, IEEE Computer Graphics and Applications Vol. 6, no. 12, pp.8-17, 1986