Robotik 2004, München, 17.-18. 6. 2004, VDI-Berichte 1841, pp. 781-788

3-Dimensionale schichtweise Bahnplanung für Any-Time-Fräsanwendungen

3-Dimensional Layered Path Planning for Anytime Milling Applications

M. Waringo, **D. Henrich**, Universität Bayreuth
E-Mail: dominik.henrich@uni-bayreuth.de, http://ai3.inf.uni-bayreuth.de

Kurzfassung

Wir präsentieren eine automatische Bahnplanung für ein robotergestütztes Frässystem mit Anwendung beispielsweise bei der Anlage von Implantatbetten in der orthopädischen Chirurgie. Das System ist beschränkt auf ein unterschneidungsfreies Eingriffsgebiet wie etwa die Kalotte, das heisst, die ganze Fläche des Eingriffsgebiets muss in der Draufsicht sichtbar sein und das vorgegebene Volumen muss ebenfalls unterschneidungsfrei sein. Aufgrund dieser Vorgaben kann man sich auf eine senkrechte Ausrichtung des Fräsers beschränken. Die Unterseite des Implantats passt jederzeit in das Implantatbett, auch wenn der Fräsvorgang vorzeitig abgebrochen wird.

Abstract

We present an automatic path planner for a robotic milling system for use for example in orthopaedic surgery. The intervention region is restricted to be non undercutting like, e. g., the calotte, which means that the whole surface of the intervention region must be visible in the view from above, and the milling volume also has to be non undercutting. These requirements allow the restriction on a vertical miller shaft orientation. The bottom side fits into the implant bed every time, even when the milling process is aborted prematurely.

1. Einleitung

Chirurgische Fräsoperationen in der lateralen Schädelbasis werden heutzutage hauptsächlich manuell durchgeführt. Diese Operation ist für menschliche Operateure anstrengend, da sie grossen Kraftaufwand und Ausdauer erfordert. Ausserdem besteht ein nicht unbeträchtliches Risiko eines Durchbruchs durch den Knochen mit konsekutivem Riss der Hirnhaut. Ein weiterer Nachteil eines manuellen Eingriffs ist das ständige leichte Zittern in der Hand, das sich nicht unterdrücken lässt. Diese Nachteile treffen nicht auf einen Roboter zu. Er ermüdet nicht, zittert nicht, und dank

der positionsgeregelten Bewegung des Fräsers tritt, im Gegensatz zur „Kräfteregelung“ beim Menschen, das Einbrechen durch die Hirnhaut ebenfalls nicht auf.

Ziel des RONAF-Projektes ist, ein System zum automatischen robotergestützten Fräsen an der lateralen Schädelbasis zu entwickeln, um zum Beispiel das Mastoid oder ein Lager für ein Hörgeräteimplantat automatisch auszufräsen (Abb. 1). Das System besitzt *Any-Time-Fähigkeit*, d. h. der Fräsvorgang kann vorzeitig abgebrochen werden, wobei jederzeit eine Fräsmulde vorliegt, in die man das Implantat passgenau einsetzen kann. Die diesem Bericht zugrunde liegende Arbeit [9] beschreibt die Planung der Bahnen, die der Roboter autonom mit dem Fräskopf abfährt um ein vorgegebenes Volumen zu entfernen.

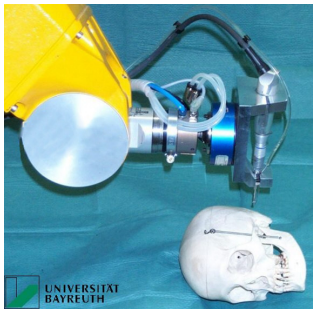

Abb. 1: Versuchsaufbau mit einem Schädeldummy

Abb. 2: Implantlager des Combi40+ (Fa. Med-El) in einem menschlichen Schädelpräparat

Abb. 3: Fräsbahnen in Seife (oben) des Implantats Vibrant Soundbridge (Fa. Siemens/Symphonix, unten)

In Kapitel 2 werden bekannte Bahnplanungsverfahren zum vollständigen Abfahren eines 2-dimensionalen Gebietes betrachtet, sowie die eigenen Vorarbeiten zur vorliegenden Arbeit. In Kapitel 3 wird das prototypische System beschrieben, Kapitel 4 beschreibt die durchgeführten Experimente, in Kapitel 5 wird das vorliegende System diskutiert und in Kapitel 6 werden noch offene Punkte angesprochen.

2. Stand der Forschung

Auf dem Gebiet der automatischen 3D-Bahngenerierung in der Chirurgie existieren bislang kaum Veröffentlichungen, da in den meisten Arbeiten auf dem Gebiet der robotergestützten Chirurgie der Roboter nicht vollautomatisch verfahren wird.

Die in dem RONAF-System verwendete 3D-Bahnplanung basiert auf einer 2D-Sweeping-Bahnplanung. Bei dieser besteht die Aufgabe darin, ein Gebiet in einer Ebene vollständig abzufahren, wobei das Gebiet diskret oder kontinuierlich definiert sein kann. Im Fall eines diskreten Gebietes kann das Volumen des Effektors mehrere Felder abdecken [4] oder nur ein Feld [2], [6]. Diese Bahnplanung kommt beispielsweise bei mobilen Putzrobotern zum Einsatz. Es lassen sich folgende drei Klassen unterscheiden:

- *Potentialfeldbasierte Bahnen* [7], [10]: Die Bahnplanung läuft in zwei Phasen ab. Zuerst wird das abzufahrende Gebiet mit Potentialen belegt, die anwendungsabhängig nach unterschiedlichen Kriterien definiert werden, wie etwa dem Abstand zum Rand des Gebiets oder zu einem definierten Zielpunkt. In einem zweiten Schritt werden Bahnen anhand der Potentiale in den Zellen erzeugt, wobei die Erzeugungsstrategie von Anwendung zu Anwendung wechseln kann.
- *Parallele Bahnen* [1]: Die Bahnen sind parallel und an einer Vorzugsrichtung ausgerichtet.
- *Konzentrische Bahnen* [4]: Es werden zur Kontur des Gebiets parallele Bahnen erzeugt, wobei bei der Planung von aussen nach innen oder von innen nach aussen vorgegangen wird.

In einer vorhergehenden Arbeit [8] wurde von den Autoren eine 3-dimensionale Bahnplanung realisiert, die auf Grundvolumina basierte, die aus konvexen 2-dimensionalen Grundflächen mit Angabe der oberen und unteren z-Koordinate bestanden (wobei die z-Achse senkrecht zum Knochen steht und von Knochen weg zeigt). Dabei wurden die Grundvolumina, in die man eine auszufräsende Geometrie manuell unterteilen musste, sukzessive ausgefräst. Die Grenzen dieser Bahnplanung lagen darin, dass die Modellierung einer Geometrie mithilfe dieser Grundvolumina aufwändig und eingeschränkt war und ausserdem die Any-Time-Fähigkeit beim Fräsen nicht erfüllt wurde.

3. Berechnung der Bahnen

Das Problem der Berechnung von 2D-Bahnen zur vollständigen Abdeckung eines Volumens stellt sich wie folgt dar. Gegeben seien drei Volumina:

- das Volumen D_{G} des Eingriffsgebiets (z. B. des Knochens),
- das Volumen D_{B} des zu entfernenden Bereiches (z. B. des Implantates),
- das Volumen D_{W} des Eingriffswerkzeugs (z. B. des Fräskopfes).

Gesucht ist eine Bahn, die der Roboter mit der Spitze des Eingriffswerkzeugs abfahren muss, um das Volumen D_{B} innerhalb des Eingriffsgebietes möglichst präzise zu entfernen.

Die Planung wird in einem diskreten Voxelraum durchgeführt. Je nach Anwendung liegen die drei angegebenen Volumina nicht als Voxelgeometrien vor und werden vor der Bahnplanung transformiert.

Falls beispielsweise der zu entfernende Bereich liegt als triangulierte Polyeder-Geometrie vorliegt[1], dann wird sie wird vor der eigentlichen Bahnplanung in einen Voxelraum diskretisiert. Dabei wird im ersten Schritt die Polyeder-Geometrie mit parallelen und äquidistanten Ebenen ge-

[1] Hier wird das standardisierte Dateiformat stl zum Austausch von Geometrien verwendet.

schnitten, die senkrecht zur z-Achse liegen. Innerhalb jeder Ebene werden die Schnittpunkte oder -kanten mit den die Geometrie definierenden Dreiecken ermittelt. Jede dieser Schnittebenen entspricht einer Ebene im späteren Voxelraum. Die ermittelten Eckpunkte werden jeweils in einer Ebene des Voxelraums linear miteinander verbunden und das entstehende Innere des Schnitts ausgefüllt. So erhält man im Voxelraum D_B eine diskretisierte Version des angegebenen Volumens, mit welcher fortan gearbeitet wird.
Die Planung im Voxelraum impliziert dabei nicht zwingend eine Reduktion der Ausführungsqualität der geplanten Bahnen, da die Auflösung des Voxelraums höher gewählt werden kann als die Wiederholgenauigkeit des Roboters.

Aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Fräskopfes unterscheidet sich das vorgegebene Volumen D_B im Normalfall vom Volumen $D_{B'}$ das ausgefräst wird (fortan „auszufräsendes Volumen“ genannt). Im Allgemeinen ist es nicht möglich, exakt das vorgegebene Volumen zu entfernen. Man kann folgende zwei Volumenbehandlungsstrategien unterscheiden:

- *Konturerhaltendes Fräsen*: keine Überschreitung des vorgegebenen Volumens ist erlaubt. Man nimmt in Kauf, dass das auszufräsende Volumen kleiner sein kann als das vorgegebene und man also nicht alles entfernen kann.
- *Konturüberschreitendes Fräsen*: das vorgegebene Volumen muss komplett entfernt werden. Man nimmt in Kauf, dass das auszufräsende Volumen grösser sein kann als das vorgegebene und man also zu viel entfernt.

In beiden Fällen ist das Volumen möglichst präzise auszufräsen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen den Unterschied zwischen beiden Strategien.

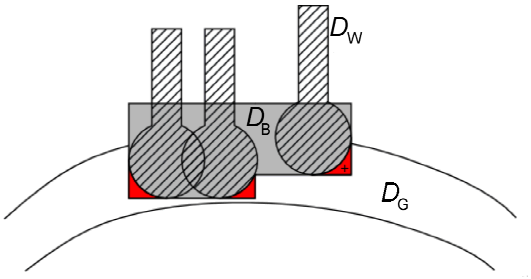

Abb. 4: Konturerhaltendes Fräsen: Gebiete ausserhalb von D_B dürfen nicht entfernt werden.

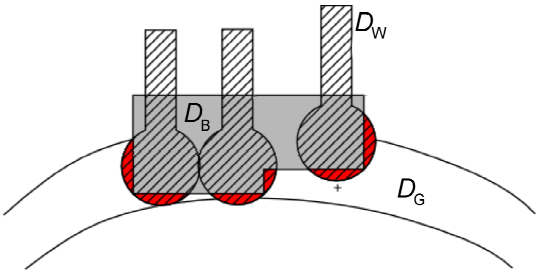

Abb. 5: Konturüberschreitendes Fräsen: Die komplette Geometrie D_B wird entfernt.

Aus dem vorgegebenen Volumen D_B wird das auszufräsende $D_{B'}$ ermittelt und danach ersteres nicht mehr beachtet. Die Punkte, die der Roboter nach und nach mit dem Aufsetzpunkt des Fräskopfes abfährt, sind so gewählt, dass das auszufräsende Volumen entfernt wird, wobei wahlweise eine der beiden eben erwähnten Strategien verwendet wird.

Dabei wird in einen Voxelraum diskretisiert die Geometrie D_W des Fräskopfes berücksichtigt. Dabei überdeckt er im Allgemeinen mehrere Voxelelemente.

Es besteht die Option, neben dem Implantat auch das patientenindividuelle Eingriffsgebiet D_G zu modellieren, um Regionen zu bestimmen, die nicht abgefahren werden, da sie in verbotenen Zonen (z.B. unter dem unteren Rand des Schädelknochens) oder in der Luft liegen. Somit erhält man an das Eingriffsgebiet angepasste Bahnen (*individuelle Bahnen*), im Gegensatz zu Bahnen, die nur von Implantat und Fräskopf abhängen (*generische Bahnen*).
Während der späteren Bahnplanung wird nur noch die Unterkontur des auszufräsenden Volumens betrachtet. In jedem Iterationsschritt sinkt sie tiefer in das Eingriffsgebiet ein. Auf diese Art lässt sich die Any-Time-Fähigkeit erreichen, da die Fräsmulde stets die Form des Unterprofils des Implantats besitzt. (Abb. 6)

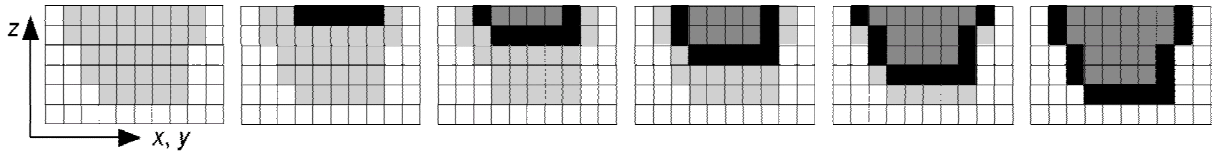

Abb. 6: Vorgehen beim iterativ einsinkenden Fräsen in einer (grob aufgelösten) Seitenansicht (Hellgraue Felder: nicht abgearbeitete Gebiete, schwarze Felder: im aktuellen Iterationsschritt abgefräste Gebiete, dunkelgraue Felder: schon abgearbeitete Gebiete)

Diese Unterkontur wird wiederum unterteilt in horizontale Ebenen, in welchen die Bahnplanung jeweils separat durchgeführt wird. Dies hat den Vorteil, dass die übermässig zeitintensive Fräskopfbewegung in die Tiefe auf ein Minimum reduziert ist[2].
Eine weitere Zeitoptimierung wird dadurch erreicht, dass die Bahnplanung nur in den Randbereichen in der vollen Auflösung des Voxelraums von D_B, erfolgt, während im Inneren auf einem gröberen Raster geplant wird, das an den Fräskopfdurchmesser angepasst ist.
Es wurden die drei im Stand der Forschung angesprochenen Bahnarten realisiert, welche jeweils in einer diskretisierten horizontalen Ebene ablaufen (Abb. 7):

[2] Bei den verwendeten Rosenbohrern können Fräsungen in die Tiefe nicht so schnell durchgeführt werden wie horizontale Fräsungen, da das entfernte Material beim Tiefenfräsen nicht seitlich entweichen kann, und weiterhin die Bahngeschwindigkeit der Schneiden und somit auch ihr Abtrag abnimmt je näher sie an der Drehachse liegen.

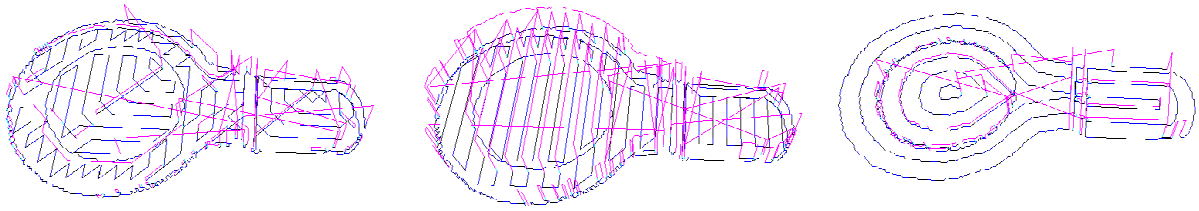

Abb. 7: Links: Potentialfeldbasierte Bahnen, Hierfür wird der Algorithmus aus [10] verwendet, Mitte: Parallele Bahnen, Rechts: Konzentrische Bahnen

Als Beispiel zeigt Abb. 8. den Fortschritt der Fräsung bei patientenindividueller Geometriebehandlung. Jedes Teilbild zeigt einen Iterationsschritt beim Prozess des Einsinkens der Unterkontur der Fräsform. Man erkennt, dass die Bahnen nicht immer das komplette Unterprofil nachbilden. In diesem Fall werden Gebiete, die oberhalb des Knochens liegen, nicht abgefahren. Ebenso sind bei späteren Iterationsschritten, also tiefer liegenden Bahnen, ähnliche Aussparungen festzustellen, welche verhindern, dass die Hirnhaut beschädigt wird.

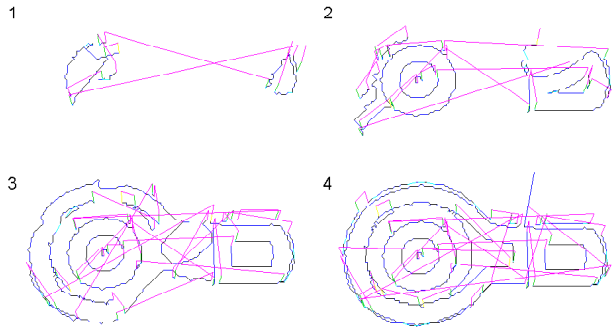

Abb. 8: Fortschritt einer Fräsung mit vier ausgewählten Iterationsschritten auf unterschiedlichen z-Ebenen

4. Experimente und Ergebnisse

Die geplanten Bahnen werden für robotergestützte chirurgische Eingriffe an der lateralen Schädelbasis verwendet. In Experimenten lässt sich überprüfen, dass die Geometrie korrekt ausgefräst wird und der Fehler in der Grössenordnung der Wiederholgenauigkeit des Roboters (0,3 mm) liegt. Dabei konnte in Experimenten beim Fräsen (in Eichenholz) unter Verwendung einer Kräfteregelung [3], [5] das Implantat Vibrant Soundbridge (Fa. Siemens/Symphonix) in 10:45 Minuten ausgefräst werden (Bahnlänge: 7,30 Meter) und das Combi40+ (Fa. Med-El) in 7:40 Minuten (Bahnlänge: 6,21 m). Es wurde ein Rosenbohrer (4,5 mm Durchmesser) verwendet. Unter den Versuchsbedingungen kam es bei einer Fräsung mit Spülung zu keinen Brandspuren am Holz oder Rauchentwicklung.

Wie man Abb. 9 entnehmen kann, sind die konzentrischen Bahnen den anderen beiden Bahnen überlegen, sowohl was die Fräsdauer als auch die Bahnlänge anbelangt. Mit *Luftverfahren* ist

das Verfahren oberhalb des Knochens gemeint, wobei der Fräser den Knochen nicht berührt. Beim *Horizontal-* und *Vertikalfräsen* wird mit dem Fräser im Knochen verfahren.

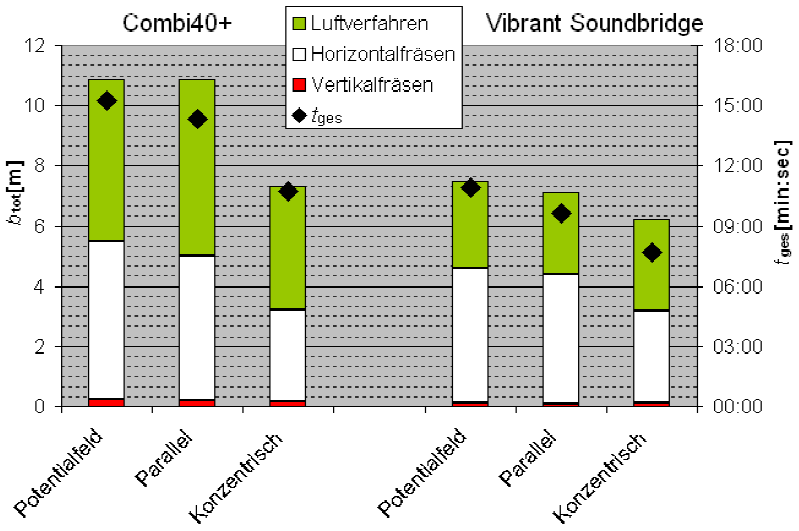

Abb. 9: Fräsdauern und Bahnlängen (unterteilt nach Bahntyp) bei zwei Implantaten und drei Bahnplanungsalgorithmen

5. Diskussion

Bei der Fräsdauer besteht noch Optimierungspotential. Die Luftfahrten können verkürzt werden, indem in einer geringeren Höhe verfahren wird und die Bahnen dahingehend verbessert werden, dass weniger Bahnsegmente in der Luft abgefahren werden. Durch eine Glättung der Bahn kann eine konstantere Abfahrgeschwindigkeit erreicht werden, die permanent beim durch die Kräfteregelung erlaubten Maximum liegt, welches sich je nach Fräsmaterial (z.B. Beschaffenheit von Holz oder Knochen) und Fräsereigenschaften (Form, Rotationsgeschwindigkeit, Abnutzung) unterscheidet.

Die Präzision der Fräsung liegt im Submillimeterbereich und ist vor allem durch den Roboter und das Werkzeug bestimmt. Für die vorgestellte Anwendung ist die Präzision ausreichend.

Bei Experimenten am Präparat liess sich ausserdem feststellen, dass ein Reißen der Dura im Gegensatz zum manuellen Fräsen aufgrund des vertikal ausgerichteten Frässchaftes und der Geometrie des Rosenbohrers praktisch ausgeschlossen ist.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Wir haben ein Planungssystem entwickelt, das es erlaubt, Any-Time-fähige Fräsbahnen zu ermitteln, welche automatisch abgefahren werden können. Als Einschränkung gilt, dass der Schaft des Fräsers stets vertikal ausgerichtet ist. Die Randbehandlungen “konturerhaltend” und “konturüberschreitend” sind realisiert, sowie die Möglichkeit, die Geometrie des individuellen Eingriffsgebiets

zu berücksichtigen. Die Fräsdauer liegt jetzt schon in einem Bereich, der den Robotereinsatz interessant macht. Die Dura wird nicht verletzt und die Hitzeentwicklung ist unkritisch.
Ein Nachteil des bisherigen Ansatzes ist die stets vertikale Ausrichtung des Fräskopfes, welches eine Einschränkung der fräsbaren Geometrien darstellt: es können nur unterschneidungsfreie Geometrien ausgefräst werden. In einem weiteren Schritt wird das System auf 5-dimensionale Fräsbahnen erweitert, wodurch sich weitere Freiheiten bei der Bahnplanung ergeben. Interessant wäre unter Umständen das Verwenden von verschiedenen Fräsköpfen, um so innere Bereiche schnell mit einem grossen Fräser und die Ränder präzise mit einem kleineren Fräser abfahren zu können.

7. Literatur

[1] E. Arkin, M. Held, C. Smith: “Optimization Problems related to Zigzag Pocket Milling”, State University of New York, Stony Brook, NY 11794-3600, USA und Institut für Computerwissenschaften Universität Salzburg, A-5020 Salzburg, Austria, Algorithmica, 1996

[2] R. N. de Carvalho, H. A. Vidal, P. Vieira, M. I. Ribeiro: ”Complete Coverage Path Planning and Guidance for Cleaning Robots”, ISIE’97 Guimaraes, Portugal, 97TH 280, 677α-682

[3] Ph. A. Federspil, P. Stolka, C. de Mola, U. Geisthoff, D. Henrich, P. K. Plinkert: “Force feedback control of robot’s speed prevents heat trauma in robotic milling at the lateral skull base”, Zentrum für Schädelbasischirurgie, Universitätskliniken des Saarlandes, Homburg und Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth

[4] Y. Gabriely, E. Rimon: „An On-Line Coverage Algorithm of Grid Environments by a Mobile Robot“,2002 IEEE Conference on Robotics & Automation, Washington DC, May 2002

[5] D. Henrich, P. K. Plinkert, Ph. A. Federspil, B. Plinkert: „Kraft-basierte lokale Navigation zur robotergestützten Implantatbettanlage im Bereich der lateralen Schädelbasis“. VDI-Bericht 1679 – Tagungshandbuch zur Robotik 2002, München/Germany.

[6] D. Schwammkrug: „Abschlußbericht TESS2“ (Technik Entwicklung Service Systeme), FAW (Forschungsbericht für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung), 2000

[7] John Seop Oh, Jin Ba Park, Yoon Ho Choi: „Complete coverage Navigation of cleaning robot based on triangular cell map“, IESE 2001, Pusan, KOREA

[8] M. Waringo: „Robotergestützte HNO-Chirurgie: Planung von Fräsbahnen“, Projektarbeit. Uni Kaiserslautern, AG Robotik und Eingebettete Systeme (RESY), 2001

[9] M. Waringo: „Robotergestützte Navigation zum Fräsen an der lateralen Schädelbasis (RONAF): Lageoptimierung und schichtweise Bahnplanung auf Basis globaler Sensordaten“, Diplomarbeit. Uni Kaiserslautern, AG Eingebettete Systeme und Robotik (RESY), 2003

[10] A. Zelinsky, R. A. Jarvis, J. C. Byrne, S. Yuta: “Planning Paths of Complete Coverage of an Unstructured Environment by a Mobile Robot”, in ICAR’93