
Anpassung eines Programmes zur Simulation von Fahrten gesteuerter Bobschlitten (Bob-Fahrsimulator) an die Erfordernisse des Trainingsbetriebes

M. Günther, P. Maißer (Projektleiter)

Techn. Universität Chemnitz-Zwickau

Institut für Mechatronik

VF 0407/20/02/98

1 Problem

Höchstleistungen sind heutzutage auch im Spitzensport ohne den Einsatz moderner wissenschaftlicher Methoden nicht mehr denkbar. Eine zentrale Rolle spielen dabei immer mehr Computersimulationen der grundlegenden Bewegungsabläufe der Sportler oder der benutzten Geräte. Dabei können Computersimulationen sowohl zur Optimierung dieser Bewegungsabläufe, zur gefahrlosen Erprobung von unbekanntem Situationen, aber auch zur Kosteneinsparung im Trainingsbetrieb, zur Geräteentwicklung und zur Leistungsdiagnostik genutzt werden.

Voraussetzung für die Entwicklung solcher Simulationswerkzeuge ist eine möglichst genaue mathematische Modellierung der Bewegungsabläufe, um exakte Aussagen im Grenzleistungsbereich treffen zu können. Andererseits sind besonders im Sport so komplexe Situationen zu beschreiben, dass zwingend Vereinfachungen vorzunehmen sind, die aber die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse nicht beeinträchtigen dürfen.

Damit die Simulationswerkzeuge von Sportlern und Trainern, für die der Umgang mit moderner Computertechnik nicht zu den alltäglichen Dingen gehört, positiv aufgenommen werden können, müssen diese Werkzeuge relativ einfach handhabbar sein und ein außerordentlich hohes Maß an Realitätsnähe vorweisen können. Deshalb ist die Entwicklung solcher Simulationswerkzeuge für den Spitzensport für jeden Wissenschaftler eine interessante Aufgabe und Herausforderung.

Kennzeichnend für den Bobsport ist eine enge Wechselwirkung zwischen motorischen Bewegungsabläufen bei den Sportlern und rein physikalischen Bewegungen der Sportgeräte auf speziellen Wettkampfstätten. Um die Bewegung eines Bobschlittens mathematisch formulieren zu können, müssen geeignete Beschreibungen sowohl für das aktive Verhalten des Piloten als auch für Schlitten und Bahnen gefunden werden.

Dieser Aufgabe widmet sich das Institut für Mechatronik seit mehreren Jahren. Ursprünglich war vorgesehen, dem Trainer ein einfaches Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, mit dem er Hinweise für das optimale Fahrverhalten an ausgewählten Schwerpunkten einiger Bahnen erarbeiten kann. Nachdem sich aber erste Erfolge gezeigt hatten, bestand seitens der Sportler, auch unter dem Eindruck eines entsprechenden US-amerikanischen Systems, der Wunsch, ein Werkzeug zur Verfügung zu haben, mit dem es möglich ist, aktiv gesteuerte Fahrten auf kompletten Wettkampfbahnen in Echtzeit zu simulieren. Insbesondere ermöglicht ein solches Werkzeug die Ausweitung der Trainingszeiten auf die Sommersaison, ohne dass Bobbahnen unter großem Aufwand vereist werden müssen. Außerdem verringert sich das Risiko besonders bei jungen unerfahrenen Piloten, das entsteht, wenn sie auf unbekannt Bahnen fahren sollen.

Die Lösung dieser Aufgabe erstreckt sich wesentlich auf die folgenden Bereiche:

- das mathematisch-physikalische Modell als Kern der Simulation,
- Online-Steuerung, Echtzeitverhalten,
- Modellierung einer realen Bahn und deren Approximation,
- Visualisierung und Validierung der Simulationsergebnisse.

Zunächst gelang es, einen Prototyp eines echtzeittauglichen Simulationswerkzeugs zu schaffen, mit dem die Simulation einer Bobfahrt mit Online-Steuerung durch einen extern angeschlossenen Schlittennachbau auf einer kompletten Bahn und die Visualisierung der Fahrt aus der Sicht des Fahrers realisiert werden kann. In der Folge eines zweimonatigen Praxistests im Olympiastützpunkt (OSP) Oberhof im Sommer 1998 konnte der Prototyp den Anforderungen an den Trainingsbetrieb weitestgehend angepasst und im Sommer 1999 schließlich endgültig an den OSP zur regulären Nutzung übergeben werden.

2 Methode

2.1 Das mathematische Modell

Als einfachstes Modell für die Bewegung eines Bobschlittens auf einer Bobbahn kann die Bewegung eines Massenpunktes auf einer zweifach gekrümmten Fläche mit kinematischem Zwang unter dem Einfluss von Schwerkraft und verschiedenen Reibungskräften dienen. Unter Nutzung differentialgeometrischer Begriffe und Methoden wird die Bewegung eines Massenpunktes auf einer Fläche als Bewegung in einem zweidimensionalen RIEMANNschen Raum betrachtet, dessen Metrik und Zusammenhang durch die Fläche bestimmt werden. Damit ist der Anschluss an die LAGRANGEsche Mechanik hergestellt,

und die dort bereitgestellten Methoden zur Dynamiksimulation sogenannter Constrained Mechanical Systems (CMS) können zur Untersuchung des o.g. Problems herangezogen werden. Dieser Ansatz führt zunächst auf ein so genanntes Ein-Kufen-Modell, in dem sowohl die Reaktionskräfte infolge der Bindung als auch Kräfte, die sich aus der Schwerkraft sowie dem Luftwiderstand und der Gleitreibung ergeben, berücksichtigt werden.

Um das System steuerbar zu machen, ist weiterhin eine Beziehung zwischen der Fortschrittsrichtung und dem aktuellen Lenkwinkel zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wird das Modell zu einem Zwei-Kufen-Modell erweitert. In diesem Kontext können dann auch Fragen wie die Zulässigkeit von Lenkmanövern untersucht werden. Die Steuerung des Zwei-Kufen-Modells beruht auf folgenden Annahmen:

- Vorder- und Hinterkufe sollen sich auf der gleichen Bahn bewegen,
- die Änderung der Metrik längs der Bahnkurve sei klein,
- der Lenkwinkel sei klein und
- die Bewegung des Bobschlittens soll in der Nähe von „Breitenlinien“ stattfinden.

Zusammen mit den dynamischen Gleichungen für das Ein-Kufen-Modell ergibt sich schließlich ein System von fünf gewöhnlichen Differentialgleichungen erster Ordnung zur Beschreibung der Dynamik des lenkbaren Bobschlittens auf einer zweifach gekrümmten Fläche, das hinreichend genau, stabil und schnell im Computer integriert werden muss.

Im Hinblick auf die geforderte Echtzeittauglichkeit des Systems sind Modellvereinfachungen nötig. Dabei besteht die Aufgabe darin, Methoden zu finden, die zum einen bei der numerischen Berechnung stabilisierend wirken und zum anderen das Lenkverhalten des Bobschlittens qualitativ und quantitativ hinreichend genau widerspiegeln, ohne die Performance maßgeblich zu beeinträchtigen. Insbesondere ist das subjektive Empfinden der Piloten zu berücksichtigen. Das betrifft in besonderer Weise den zugrundegelegten Steueralgorithmus, der unter Berücksichtigung von orts-, geschwindigkeits- und normalkraftabhängigem Feedback sowohl quantitativ anhand von Ergebnisprotokollen im Rahmen der den Bearbeitern verfügbaren Vergleichsmöglichkeiten als auch qualitativ durch Beurteilung der subjektiven „Fahreindrücke“ von erfahrenen Athleten verifiziert wurde. Insbesondere wird der Nachteil des Modells, Driften nicht zu berücksichtigen, in gewissem Sinne durch unterschiedliche Feedback-Faktoren ausgeglichen.

Bislang nicht berücksichtigt werden konnte eine adäquate Reaktion auf Bandenkontakte, die in vielen realen Fahrsituationen wesentlich über Erfolg oder Misserfolg entscheiden. Vielfach baut auch das Fahrverhalten der Piloten auf der Erfahrung solcher Kontakte, die

zum Teil bahnbedingt unvermeidbar sind, auf. Eine Lösung in Verbindung mit am Institut für Mechatronik laufenden Arbeiten zu allgemeinen Kontaktproblemen ist in naher Zukunft realisierbar.

2.2 Bahndatenapproximation

Grundlage für die Approximation einer realen Bobbahn sind Originalvermessungsdaten, mit deren Hilfe ein zweidimensionales Gitter erzeugt wird. Aus diesem Gitter werden zur Laufzeit des Programms mit Methoden der B-Spline-Approximation Flächenkoordinaten und differentialgeometrische Kenngrößen berechnet.

B-Splines haben die positive Eigenschaft, dass sich lokale Änderungen auch nur lokal auswirken und so die erzeugte Fläche insgesamt den strengen Forderungen an die Glattheit genügt. Die verfahrensbedingten Abweichungen der approximierten Fläche vom erzeugenden Gitter liegen im Bereich von maximal 2 cm und sind somit insbesondere im Hinblick auf die Eisdicke vernachlässigbar.

Die Vorbereitung der Bahndaten (Gittererzeugung, Modifikation des Gitters, Generierung von Spline-Koeffizienten) wird mit einem gesonderten Computerprogramm interaktiv durchgeführt.

2.3 Programmtechnische Umsetzung

Bis 1995 wurden sämtliche Programme für die Zielplattform MS-DOS entwickelt. Als Programmiersprache wurde PASCAL gewählt. Die Programme waren modular strukturiert und verfügten ab 1992 über eine selbstentwickelte grafische Bedienoberfläche, die jedoch nur schwer portierbar war.

Mit dem Entschluss, für die weitere Entwicklung ab 1996 leistungsfähige Grafikworkstations unter Windows NT und die Grafikkbibliothek OpenInventor zu nutzen, war die komplette Portierung des Quellcodes nach C++ notwendig.

Für eine optimale Nutzung der Möglichkeiten von OpenInventor sind bei der Portierung objektorientierte Ansätze weitestgehend berücksichtigt worden. Diese Vorgehensweise ermöglicht auch die relativ einfache Einbindung des Simulationsprogramms in eine mit Hilfe der Microsoft Foundation Classes (MFC) erstellte Windows-Oberfläche.

Das aktuell vorliegende Simulationsprogramm enthält alle wesentlichen funktionalen Bestandteile eines Fahrersimulators, d.h. die Auswahl der Bahn und entsprechender Daten über eine Definitionsdatei im Textformat, Auswahl und Abgleich des Lenkmechanismus, Einstellung von Startwerten für die Simulation, die online-gesteuerte Fahrt selbst, die Anzeige von Ergebnissen in Diagrammform, Ausgabe der Ergebnisse als Textdatei, Tabelle oder in gedruckter Form, Import- und Exportmöglichkeiten für Lenkaktivitäten, nachträgliche Visualisierung von Fahrten. Insbesondere ist das Programm vollständig echtzeitfähig, d.h. das Zeitverhalten von Simulation und Animation wird direkt über eine

Echtzeituhr gesteuert und synchronisiert. Die Zeitsteuerung selbst ist dabei hardwareunabhängig, so dass der Fahr Simulator letztlich auch auf schwächeren Systemen in Echtzeit lauffähig ist. Aufgrund mangelnder Grafikperformance wird dann allerdings die Animation nicht mehr flüssig genug (d.h. mehr als zehn Bilder pro Sekunde) bzw. nicht im Vollbild laufen.

3 Ergebnisse

Aufbauend auf einer am Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften von Professor Maißer erarbeiteten Studie zum Fahrverhalten von Bobschlitten, entstand 1991 die Idee, die Ergebnisse in einem Computerprogramm umzusetzen, mit dem Ziel, dieses Programm zu einem umfassenden Simulationswerkzeug zu erweitern. Zu Beginn konnte anhand einfacher Modellrechnungen mit einem Ein-Kufen-Modell für den Bob und idealisierten Bahnabschnitten der Beweis erbracht werden, dass die Simulationsaufgabe mit einem gewöhnlichen Personalcomputer hinreichend genau und schnell zu lösen ist. Daraufhin wurde im weiteren Verlauf eine einfache Online-Steuerung realisiert. Die Simulationsergebnisse konnten aus der Sicht eines äußeren Beobachters als Fahrspuren in den Bahnabschnitten animiert werden. Im Hinblick auf die Einbeziehung von Abschnitten echter Bahnen wurden zunächst die bisher verwendeten abstrakten Modellflächen diskretisiert und aus diesen diskreten Daten für die Simulation rekonstruiert. Auf diese Weise konnten 1993 erstmals Originalvermessungsdaten von ausgewählten Abschnitten der Bahn von LaPlagne bzw. Konstruktionsdaten von Teilen der Bahn von Lillehammer für die Simulation genutzt werden. Das Online-Steuermodell wurde dahingehend erweitert, dass von einem Zwei-Kufen-Modell ein realer Lenkwinkel ausgewertet werden kann, der extern durch ein Potentiometer eingestellt wird und über einen A/D-Wandler als Input zur Verfügung gestellt wird. Die Simulation der Bobfahrten und die Animation der entsprechenden Fahrspuren wurden mit einem 486er PC in Echtzeitnähe bewältigt.

Nach der Vorstellung des Bob-Fahr Simulators in dieser Form entstand vor allem unter den Sportlern der Wunsch nach einer Visualisierung der Simulation aus Sicht der Piloten, nach der Einbeziehung kompletter Bahnen in das Programm und nach einem realistischeren Lenkmechanismus. Die Lösung dieser Aufgaben war Gegenstand der Arbeiten in 1994 und 1995. Wesentliches Ergebnis war ein allgemeines Verfahren zur Verwertung von Konstruktionsdaten realer Bahnen zur globalen Approximation, was für die Bahnen von Winterberg und Altenberg exemplarisch ausgeführt werden konnte.

Eine umfassende Analyse des damaligen Entwicklungsstandes von PC-Technik und Grafiksoftware ließ es Anfang 1996 realistisch erscheinen, dass aufbauend auf den Forschungsergebnissen der Vorjahre ein radikaler Wechsel der Hard- und Softwareplattform eine zufriedenstellende Echtzeitlösung der Simulations- und Animationsaufgabe ermöglicht.

Im Mai 1997 konnte der neue Fahrsimulator am BISp der Öffentlichkeit erfolgreich präsentiert werden. Technische Grundlage dieses Systems war ein damals sehr hochwertiger PC Intergraph TDZ-300 unter dem Betriebssystem Windows NT, dessen Grafikkarte hardwaremäßige OpenGL-Unterstützung, Geometriebeschleunigung und Z-Buffering bietet. Der Anschluss des Trackingsystems erfolgt über einen einfachen A/D-Wandler. Softwaremäßig wurde die Aufgabe durch den Einsatz der objektorientierten 3D-Grafikbibliothek OpenInventor gelöst.

In der Folgezeit wurde das Programm in enger Zusammenarbeit mit Trainern und aktiven Athleten auf einen Praxiseinsatz vorbereitet. Insbesondere am Steuermodell wurden Änderungen vorgenommen, die dem subjektiven Empfinden der Piloten weitestgehend entsprechen. Einer äußerst erfolgreichen Vorstellung des Fahrsimulators auf der Hannover-Messe im April 1998 schloss sich der erste Praxistest im Sommer 1998 im OSP Oberhof an. In Auswertung dieser Erprobung durch erfahrene Athleten wurden zum Abschluss des Projektes mehrere Anpassungen und Veränderungen vorgenommen, die für den realen Trainingsbetrieb von Bedeutung sind. Das betrifft im Wesentlichen die konkrete Gestaltung der grafischen Oberfläche, Fragen der Robustheit und Bedienungssicherheit sowie die Einbeziehung von Auswertungsfunktionalität (Protokolle, Import/Export von Ergebnissen, Druckfunktionen).

4 Anwendung und Ergebnistransfer

Der Prototyp des Bob-Fahrsimulators befindet sich seit Sommer 1999 am Olympiastützpunkt in Oberhof und wird im Trainingsbetrieb vor allem im Nachwuchsbereich und in der Sommersaison eingesetzt. Eine Ausstattung weiterer OSP scheint wegen der Erfahrungen aus Oberhof sehr sinnvoll. Voraussetzung ist die Ausrüstung mit entsprechendem Equipment, wobei beim derzeitigen Stand der Technik im wesentlichen auf Standardsysteme zurückgegriffen werden kann. Als Lenkwinkelerfassungssystem ist prinzipiell jedes der vorhandenen Trackingsysteme einsetzbar.

Für eine umfassende Nutzung des Systems - vor allem im Nachwuchsbereich - ist eine Voraussetzung, dass das zur Verfügung stehende Bahndatenmaterial (derzeit nur in Winterberg und Altenberg) drastisch erweitert wird. Das Verfahren der Bahndatenaufbereitung kann entsprechend den aktuellen Erfordernissen des Fahrsimulators durch konsequente Modularisierung und Trennung von Gittererzeugung und Approximation weiter vereinfacht werden. Daten können auch in unterschiedlichsten Formen verarbeitet werden (z.B. auch Vermessungsdaten von Bahnen, für die keine Konstruktionsunterlagen beschafft werden können). Die Einbeziehung von zusätzlichen Umgebungs- und Geländeinformationen, die laut Aussagen der Piloten für ihr subjektives Empfinden von großer

Wichtigkeit sind, ist bereits möglich und bei dem rasantem Entwicklungstempo der grafischen Datentechnik von zunehmender Bedeutung.

Schließlich ist zu berücksichtigen, dass der Simulator in seinem aktuellen Entwicklungsstand nur Sportler ansprechen wird, die im Wesentlichen durch visuelle Reize in ihrer Motorik stimuliert werden. Ein nicht geringer Teil erwartet aber von einem einsatzfähigen Fahrsimulator auch die Simulation von durch die Fahrt erzeugten Bewegungsreizen, insbesondere Stößen und Querschleunigungen bei Kurvenein- und -ausfahrten sowie Bandenberührung. Die dafür notwendigen Kenngrößen werden vom System bereits zum Teil berechnet und können geeignet exportiert werden. Die Kopplung mit einem handelsüblichen Bewegungssimulationssystem sollte exemplarisch durchgeführt werden.

Inwiefern die o.g. Ergänzungen und Weiterentwicklungen realisiert werden sollen und können, ist im Rahmen des laufenden Einsatzes im OSP Oberhof und mit dem Deutschen Bob- und Schlittensportverband (DBSV) zu klären. Sinnvoll ist der Abschluss einer Vereinbarung zur Systembetreuung zwischen dem Institut für Mechatronik, dem OSP und dem DBSV, in der zum einen Umfang und Rahmen der laufenden Wartungsarbeiten und zum anderen ein (dynamisch zu präzisierender) Katalog von weiterführenden Arbeiten bis hin zu trainingsmethodischen Empfehlungen definiert werden.

5 Literatur

- GÜNTHER, M.; KIELAU, G.; MAIßER, P.: Simulation von Fahrten gesteuerter Bobschlitten. *ZAMM. Z. angew. Math. Mech.* 74 (1994) 9, 434–435
- MAIßER, P.: Brachystochronen als zeitkürzeste Fahrspuren von Bobschlitten. *ZAMM. Z. angew. Math. Mech.* 78 (1998) 5, 311–319
- ZHANG, Y.L.; HUBBARD, M.; HUFFMAN, R.K.: Optimum Control of Bobsled Steering. *JOTA* 85 (1995) 1, 1–19