

Bewegungssimulation am Beispiel einer Stewart Plattform

Isliker, M.

Das Institut für Maschinenwesen hat im Rahmen des Euro-Projekt MACDRIVE (Förderprogramm TSME/Craft) den mechanischen Aufbau eines Fernsteuerungssystems für Bagger, die in Gefahrenzonen zum Einsatz kommen sollen, entwickelt. Das System soll mittels der Aufnahme von Signalen (Bewegung, Bilder, Geräusche, ...) aus dem Einsatzbereich des Baggers und deren Übertragung auf den Maschinenbediener eine exakte Fernsteuerung ermöglichen. In diesem Artikel wird die Problematik der Bewegungssimulation beschrieben und die konstruktive Lösung des Simulators vorgestellt.

Within the European research project MACDRIVE (programme TSME/Craft) the Institut für Maschinenwesen has developed the mechanics of a remote control system for excavators operating in dangerous environments. Through reception of signals (motion, images, noise, ...) from the operating area and their transmission to the operator the system is supposed to enable exact remote control. This article describes the motion simulation problem and the design solution for constructing a motion simulator.

1 Hintergrund der menschlichen Bewegungswahrnehmung

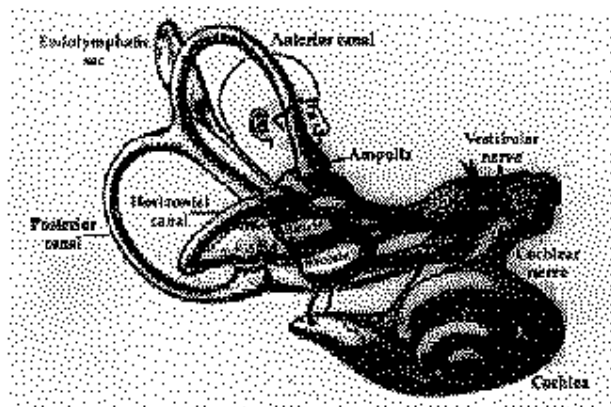


Bild 1: Der menschliche Vestibularapparat

Wahrscheinlich werden Sie sich fragen, was dieses außerirdische Objekt in **Bild 1** zu bedeuten hat und warum der Kopf eines Menschen dahinter abgebildet ist. Es stellt einen Vestibularapparat dar, das „Gleichgewichtsorgan“ des Menschen. Anhand dieses Organs wird im folgenden beschrieben, wie

Bewegungen vom Menschen wahrgenommen werden.

Der Vestibularapparat spielt eine wesentliche Rolle bei der Lage- und Räumlichkeitsorientierung des Menschen.

Die Orientierung des Menschen im Raum wird durch folgende Sinnesorgane gesteuert:

1. Den **Augen**

Als wichtigste Sinnesorgane ermöglichen sie dem Menschen die Orientierung und die Erhaltung des Gleichgewichtes durch visuelle Wahrnehmung der Lage in seiner Umgebung.

2. Dem **Vestibularapparat**

Dieser befindet sich im Mittelohr angeordnet zwischen den Felsenbeinen und setzt sich zusammen aus:

- drei Bogengängen, welche die Drehbeschleunigung in 3 senkrecht zueinander stehenden Ebenen des Raumes wahrnehmen, und
- dem Utriculus mit Otolitenorgan, der die Schwerkrafteindrücke vermittelt.

Die Bogengänge bestehen aus knöchernen Kanälen, in denen ein häutiges Röhrensystem verläuft, angefüllt mit einer Flüssigkeit, der Endolymphe. An der Basis jedes Bogenganges befindet sich eine Erweiterung, die Ampulle, welche Sinneszellen mit Sinneshärchen enthält. Diese Härchen ragen als Cupula zusammengefaßt in die Endolymphe hinein.

Bei einer Drehbewegung (Winkelbeschleunigung) in der Ebene eines Bogenganges bleibt die Endolymphe aufgrund ihrer Trägheit zurück und biegt hierbei die Sinneshärchen der Cupula in der entgegengesetzten Richtung ab. Auf diese Weise entsteht ein Sinnesreiz, der zur richtigen Wahrnehmung der Drehbewegung im zentralen Nervensystem führt.

Zur Auslösung eines Reizes durch die Cupula ist eine Mindest-Drehbeschleunigung von $1^\circ/\text{sec}^2$ erforderlich. Geringer beschleunigte Drehungen werden nicht wahrgenommen, sie sind unterschwellig. Die Reizschwelle der Bogengänge liegt zu hoch. In Situationen, in denen unterschwellige

Reize auf überschwellige Reize folgen, wird nur die überschwellige Komponente wahrgenommen.

Liegt zwischen einer kurzzeitigen Drehung und der entsprechenden Gegenbewegung ein längerer Zeitraum, z. B. eine Kurve, so wird die zuerst durchgeführte Bewegung „vergessen“ - wenn sie nicht sogar schon unterschwellig gewesen ist. Die zweite Bewegung, - die Rückdrehung in die Normallage -, wird als eine Kippbewegung in die Gegenrichtung empfunden, - sie führt zu einer „falschen“ Lageempfindung.

Der im Utriculus und Sacculus sitzende Otolithen-Apparat gewährleistet die Lageorientierung bezüglich der Schwerkraft.

Am Boden des Utriculus und des Sacculus liegt eine Nervenzellschicht mit senkrecht nach oben stehenden Sinneshärchen, die durch eine dünne Membran hindurchragen. Auf dieser Membran lagern winzige Kalkkristalle - die Otolithen. Die relative Lage dieser Otolithenmembran und der von ihr ausgeübte Druck bilden den Reiz, welcher dem zentralen Nervensystem Informationen über die Stellung des Kopfes in Bezug auf die Senkrechte liefert.

Bei Neigungen des Kopfes werden die Sinneshärchen in der Neigungsrichtung abgelenkt, die Otolithenmembran wird verlagert und damit die Wahrnehmung der veränderten Lage gewährleistet. Beim Autofahren, stärker noch beim Fliegen, kommen während des Beschleunigens Trägheits- und Fliehkräfte zur Erdbeschleunigung hinzu, deren Resultierende natürlich nicht mit der Vertikalen identisch sind.

Die Bewegungswahrnehmung basiert jedoch nicht nur auf Informationen die vom Vestibularapparat, sondern auch von Haut- und Gelenkreizrezeptoren, übermittelt werden. Aufgrund der Oberflächen- und Tiefensensibilität kann der Mensch auf Zug- und Druckerscheinungen an seiner Haut oder anderen Gewebeteilen, auf Beugungs- und Streckwirkungen an den Gelenken und auf Veränderungen der Muskel- und Sehnenanspannung mit einer Beschleunigung der Nervenimpulse reagieren. Diese Impulse übermitteln dem Gehirn die Änderungen der Krafteinwirkungen.

2 Hintergrund der Bewegungssimulation

Das Ziel ist, Fahrbewegungen so zu simulieren, daß am Simulator das Gefühl entsteht, ein reales Fahrzeug zu steuern. Hierzu muß der Simulator so bewegt werden, daß dieser beim Fahrer Empfindun-

gen hervorruft, die der wirklichen Situation ähnlich sind. Das ist möglich, da das menschliche Nervensystem sehr anpassungsfähig ist. Mittels Stimulationen unterschiedlicher Intensität kann das gleiche Bewegungsgefühl vermittelt werden, ohne ein eins-zu-eins Verhältnis zwischen Simulator und Realität verwirklichen zu müssen.

Idealerweise sollte der Simulator sich den Bewegungen eines echten Fahrzeuges entsprechend verhalten. In der Realität kann dieses jedoch nicht erreicht werden, da der Simulator nur einen begrenzt verfügbaren Arbeits-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbereich besitzt.

Es ist erforderlich, die notwendigen Eingaben zur Steuerung des Simulators so zu modifizieren, daß eine Überschreitung der strukturellen Grenzen des Simulators vermieden wird. Die Veränderungen werden entsprechend der Eigenschaften des menschlichen Vestibularsystems durchgeführt, um dem Fahrer so die richtige Bewegungsempfindung zu vermitteln.

Die wichtigsten Bewegungsparameter, die durch das Vestibularsystem wahrgenommen werden, sind die Winkelgeschwindigkeiten und die sogenannte spezifische Kraft. Diese Reize werden nur dann wahrgenommen, wenn sie bestimmte Werte überschreiten und die zugehörigen Frequenzen in wahrnehmbare Bereiche fallen:

- Winkelgeschwindigkeiten, die innerhalb des Frequenzbereiches 0,5 rad/sec bis 10 rad/sec liegen, können wahrgenommen werden.
- Spezifische Kräfte werden erkennbar innerhalb 0 rad/sec und sehr hohen Frequenzen.

Der Begriff „spezifische Kraft“ soll im folgenden näher erläutert werden.

Die „spezifische Kraft“ ergibt sich aus der Summe aller externen Kräfte, die auf einen Körper wirken, geteilt durch die Körpermasse und anschließender Subtraktion der Schwerkraftkomponente.

Beispiel: Ein Mensch, der auf einen Stuhl sitzt, spürt eine Kraft auf seinen Körper wirken, die ihn nach oben drückt. Diese Kraft ergibt sich aus der Reaktion des Stuhles gegen die Schwerkraftkomponente, die nach unten wirkt. Die Schwerkraft selbst wird nicht wahrgenommen. Wenn diesem Menschen gleichzeitig Stuhl und Boden entzogen werden, fällt er ohne eine Kraft wahrzunehmen in die Tiefe. Die spezifische Kraft hat den Wert Null. Die spezifische Kraft ist das, was der Mensch durch die Deformation verschiedener Körperteile während des Sitzens empfunden hat.

Für das Steuerungssystem des Simulators bedeutet dies, daß die Eingaben der Winkelgeschwindigkeit und der spezifischen Kraft unter Berücksichtigung der Grenzen des Simulators so realistisch wie möglich reproduziert werden müssen. Eine der wichtigsten Bewegungen stellt dabei die lang anhaltende spezifische Kraft dar, da diese einen großen Arbeitsbereich fordert. Eine Reduzierung des Arbeitsbereiches kann mittels des sogenannten „koordinierten Umkreises“ erreicht werden. Dieser Umkreis realisiert die Translationsbewegung, um die Eingabe einer kurzzeitigen Beschleunigung simulieren zu können. Der Simulator wird langsam gebeugt und so die Empfindung einer lang anhaltenden Kraft- bzw. Beschleunigungseinwirkung unter Verwendung der Gravitationskomponente erzielt. Der Beugungswinkel muß jedoch unterhalb der menschliche Wahrnehmungsschwelle liegen, um eine falsche Bewegungsempfindung des Fahrer zu vermeiden. Hierdurch werden Rotations- und Translationsbewegungen „koordiniert“ und somit longitudinale und laterale spezifische Kräfte erzeugt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Entwicklung eines mathematischen Simulationssteuerungsmodells ist die Definition zweier Referenzpunkte. Der erste Punkt muß irgendwo im Cockpit des Fahrzeuges (z. B. auf dem Stuhl des Fahrers) liegen. An diesem Punkt werden Winkelgeschwindigkeit und lineare Beschleunigungen gemessen. Diese Werte müssen anschließend über die Steuerung exakt transformiert werden, um die Bewegungsempfindungen am zweiten Referenzpunkt im Simulator zu reproduzieren.

3 Die Stewart Plattform: Beschreibung der Architektur

Die Stewart Plattform gehört zu den sogenannten „parallelen Mechanismen“ (**Bild 2**). Diese Art der

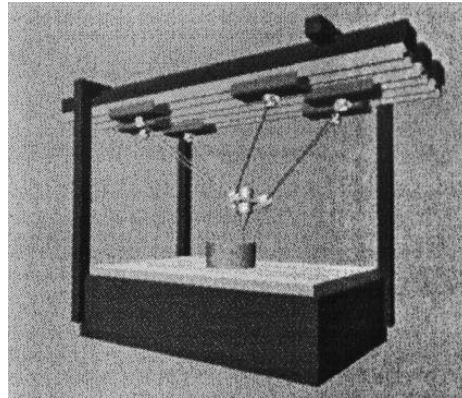


Bild 2: Beispiel eines parallelen Mechanismus

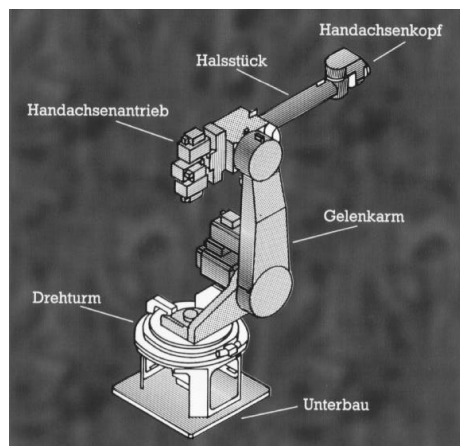


Bild 3: Beispiel eines Serienmechanismus

Konstruktion unterscheidet sich vom „Serienmechanismus“ (**Bild 3**) dadurch, daß der bewegliche Teil durch vielfach geschlossene kinematische Ketten zu einem festen Teil verbunden ist.

Serien- und Parallelstrukturen liefern wichtige ergänzende Eigenschaften aufgrund ihrer Festigkeit, ihrer Größe des Arbeitsraumes sowie ihres Verhältnisses zwischen Tragfähigkeit und eigenem Gewicht.

Bei Betrachtung unter kinematischen Gesichtspunkten weisen diese Strukturen einen Dualismus auf, der wie folgt beschrieben werden kann: Für Serienstrukturen

existiert ein sogenanntes „inverses kinematisches Problem“ (welche Eingaben sind nötig, um eine bestimmte Position zu erreichen). Parallele Mechanismen hingegen besitzen ein „direktes kinematisches Problem“ (welche Position wird erreicht, wenn die Eingaben bekannt sind).

Die Stewart Plattform wurde nach D. Stewart benannt. Stewart und McGough haben bereits Mitte der 60er Jahre parallel angeordnete Gelenke für steife 6-Freiheitsgrad-Roboter in Flugsimulatoren und Reifenprüfgeräte eingesetzt.

Die Stewart Plattform ist eine bewegliche Konstruktion, die durch sechs „Beine“ zu einer festen Basis verbunden ist. Jedes Bein setzt sich (von unten nach oben) aus einem passiven Hooke Gelenk, einem aktiven prismatischen Gelenk (Hubzylinder) und einem passiven sphärischen Gelenk zusammen (**Bild 4**).

4 Ermittlung des Arbeitsbereiches mittels des CAE-Systems Pro/MECHANICA

Aufgrund der genannten Vorteile wurde entschieden, die Stewart Plattform für den Simulator einzusetzen, obwohl damit nur ein begrenzter Arbeitsbereich zur Verfügung steht.

Für die Analyse und Lösung der Konstruktionsprobleme wurde das CAE-System Pro/MECHANICA eingesetzt.

Schon in der Anfangsphase wurde deutlich, daß die Verwendung eines sphärischen Gelenkes als Verbindung der Beine mit der oberen Plattform nicht in Frage kommen konnte, da die kommerziell verfügbaren Gelenke nur sehr geringe Rotationsbewegungsmöglichkeiten bieten. Als konstruktive Lösung wurde deshalb ein Hooke Gelenk ausgewählt. Und unter der Verwendung zusätzlicher Lager konnte so die Drehung um die dritte räumliche Achse ermöglicht werden.

Eine weitere Veränderung des Aufbaus mußte für die Berechnung vorgenommen werden. Für eine vollständige Ermittlung der verschiedenen Bewegungsmöglichkeiten der Plattform fehlten nämlich die notwendigen Eingabeparameter der einzelnen Hubzylinder. Vereinfachend wurde im Schwerpunkt der oberen Plattform ein zentrales Gelenk eingesetzt. Somit war ein „direkter“ Antrieb der Plattform möglich.

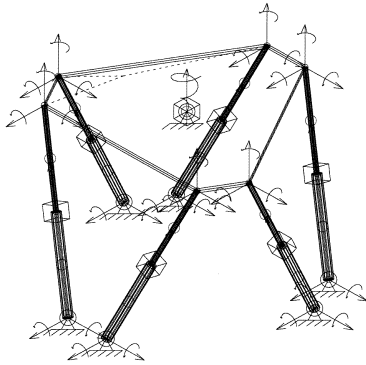


Bild 4: Pro/Mechanica Modell der Stewart Plattform

Die anschließende Analyse bestätigte die Richtigkeit der Vereinfachung und den Einsatz des Hooke Gelenkes in Verbindung mit einer zusätzlichen Drehachse (**Bild 4**).

Die Gleichungen $\beta = R_o/R_u$ und $\beta = L_{max}/R_u$ ergaben sich aus den folgenden Annahmen: Die untere Plattform wird durch einen Kreis mit dem Radius R_u beschrieben und die obere durch einen Kreis mit dem Radius R_o ($1/1$). L_{max} ist die maximale Länge eines Beines und wird durch die Auswahl des Hubzylinders festgelegt.

Um das Umkippen des Simulators zu vermeiden, wurde der

Wert β auf ca. 1.65 eingestellt. (Je größer β ist, desto größer ist die untere Plattform.) Der Wert $\beta=1.65$ erzielt ein optimales Verhältnis zwischen Festigkeit und Größe des Arbeitsbereiches, wenn der Wert sich innerhalb des Intervalles [0.95, 1.2] bewegt ($1/1$). Die Durchführung mehrerer Simulationen unter Variation des β -Wertes ergab schließlich für $\beta=1$ einen maximalen Arbeitsbereich. Damit betragen die Radien R_o und R_u der Stewart Plattform 265 mm.

Der Festlegung der optimalen Gestaltung folgte die

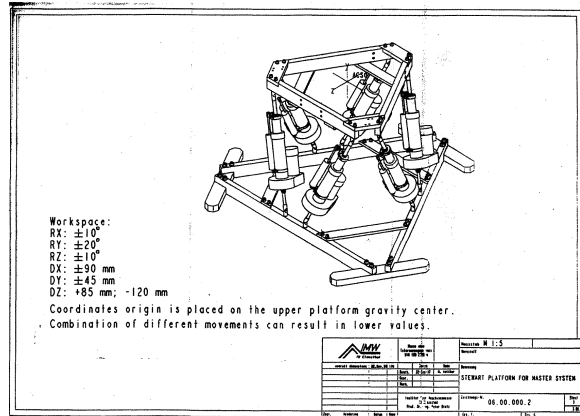


Bild 5: Konstruierte Stewart Plattform

Simulation der 6 Grundbewegungen (3 Translationen und 3 Rotationen) im CAE-System. Die Ermittlung der in **Bild 5** dargestellten Ergebnisse erfolgte über eine Bewegungsunterbrechung der Plattform sobald eine singuläre Position (obere Plattform und ein Beinpaar liegen in einer Ebene) oder der maximale oder minimale Hub des Zylinders erreicht wurde.

5 Ausblick

Während des *First Year Assessment Meeting* im Dezember '97 in Brüssel wurde ein nach den Vorgaben des IMW gebauter Prototyp des Simulators (**Bild 6**) mit Erfolg vorgestellt. Im September '98 sind erste Versuche in Verbindung mit einem realen Bagger bei einem griechischen Unternehmen geplant.

6 Literatur

- 1/ Bhattacharya, S.; Hatwal, H.; Ghosh, A.: On the optimum design of Stewart Platform type parallel manipulators, *Robotica*, März-April 1995

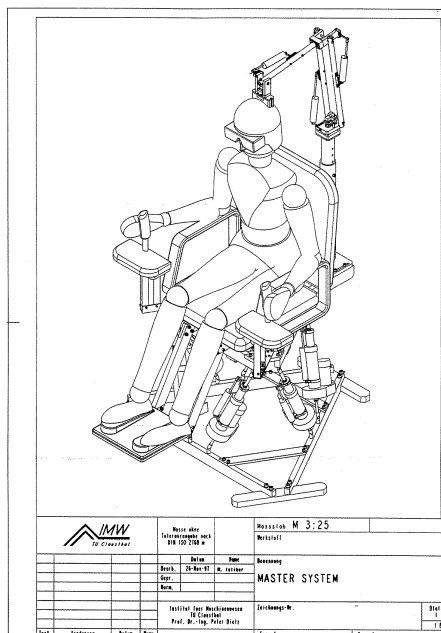


Bild 6: Konstruiertes Simulator