

Träge zum Ziel

Im täglichen Leben verhindert Trägheit eher ein Fortkommen, in Technik und Verkehr – egal ob zu Lande, zu Wasser oder in der Luft, bietet sie jedoch u. a. die Grundlage dafür, komfortabel und ohne größere Störungen ans Ziel zu kommen.

Fernsehbilder von einem Helikopter aus, etwa bei den Übertragungen der Tour de France, sind erstaunlich ruckelfrei und stabil (Abb. 1). Kaum vorstellbar, dass es einem Kameramann gelingt, seine Kamera bei all dem Getöse und Gewackel so ruhig



Abb. 1: Dank Inertialmesstechnik liefern Kameras an Helikoptern ruckelfreie Bilder. (Quelle: iMAR/HTM)

zu halten. Grundlage für das künstliche „ruhige Händchen“ ist die so genannte Inertialmesstechnik, die z. B. auch eine wichtige Rolle beim elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) spielt, mit dem Daimler Benz das Elchtest-Problem überwinden konnte.

Die Fahrdynamikanalyse ist dabei eine von vielen Anwendungen der Inertialmesstechnik, deren Aufgabe es ist, den Bewegungszustand eines Objekts aus dessen Dynamik zu erfassen und nicht durch eine Messung von außen. Immer geht es darum, die auftretenden Beschleunigungen genau genug zu messen, damit ein entsprechender Algorithmus geeignete Gegenmaßnahmen in Gang setzen kann, z. B. Bremsmanöver, die einem Umkippen entgegenwirken. Dafür werden sowohl die Beschleunigungen als auch die Drehbewegungen detektiert und aus ihnen die gewünschten Bewegungsgrößen – Position, Geschwindigkeit, Orientierung – errechnet und von dem Koordinatensystem, in dem die Daten anfallen, in das System transformiert, das der Anwendung entspricht.

Inertiale Messsysteme, auch Trägheitsmesssysteme genannt,

sind nicht nur in der Fahrdynamikanalyse beim Auto unverzichtbar geworden, sondern werden bei der Führung und Stabilisierung von Industrierobotern oder bei der aktiven Neigungstechnik von Schienen- und Straßenfahrzeugen eingesetzt.

Sie sind autonome Systeme, die weder Signale von außen aufnehmen noch nach außen abgeben. Die Positionsänderung eines Körpers wird alleine aus den Beschleunigungen, die auf ihn einwirken, gewonnen – etwa so, wie ein Mensch in einem Auto ohne Fenster trotzdem weiß, ob gerade gebremst wird oder ob es in eine scharfe Linkskurve geht. Darin liegt zugleich die Beschränkung: Die Inertialvermessung misst nur Positionsänderungen, keine absoluten Positionen – sie ist also ein relatives Verfahren, das die Angabe einer Startposition benötigt. Deshalb werden Inertialmesssysteme oftmals mit anderen Techniken kombiniert, in der Navigation beispielsweise mit dem GPS¹⁾, das in bestimmten Zeitabständen immer wieder neue Positionsdaten liefert.

Träge Masse ...

Der Inertialmesstechnik liegt, wie der Name schon besagt, die Eigenschaft der trägen Masse zugrunde, erst dann ihren Bewegungszustand zu ändern, wenn äußere Kräfte auf sie einwirken. Kennt man alle diese Kräfte, dann kann nach dem zweiten Newtonschen Axiom die Bewegungsbahn eines Körpers eindeutig bestimmt werden, wenn zusätzlich die Anfangsposition und die Anfangsgeschwindigkeit festgehalten werden. Mathematisch ausgedrückt: aus Newtons Bewegungsgleichung $F = m \cdot a = m \cdot \dot{v}$ folgt durch eine Integration zunächst die Geschwindigkeit; die Position ergibt sich dann aus einer zweiten Integration: $s = \int \int F/mdt^2$. Newtons Bewegungsgleichung ist streng genommen nur in einem Inertialsystem gültig, also einem Referenzsystem,

das sich relativ zu den Fixsternen weder linear beschleunigt noch rotierend bewegt. Ein solches Inertialsystem existiert eigentlich nur im interstellaren Raum, wo praktisch keine Gravitation existiert. Man macht aber keinen allzu großen Fehler (auf jeden Fall kleiner als die Messgenauigkeit), wenn man für inertielle Messsysteme ein geozentrisches (also nicht mit der Erde rotierendes) Inertialsystem mit fester Raumorientierung benutzt.

In der so genannten Gravimetrie, die sich mit der Messung des Erdschwerefeldes für geophysikalische Fragen befasst, werden meist hochentwickelte Feder-Sensoren verwendet, um anhand einer Änderung der Fallbeschleunigung Lagerstätten aufzuspüren oder um Gezeiten und Erdbeben zu untersuchen. In der Inertialnavigation haben sich dagegen Pendel-Beschleunigungsaufnehmer durchgesetzt. Diese bestimmen die Beschleunigung aus der Ablenkung eines Pendels. Fast ausschließlich werden diese Beschleunigungsmesser als geschlossene, rückgekoppelte Regelkreise (closed loop) aufgebaut, bei denen ein elektrischer Abgriff benutzt wird, um die Position des Pendels gegenüber dem Gehäuse zu messen. Die so erhaltene Spannung wird an eine Momentenspule angelegt, die das Pendel wieder in seine Nulllage zurückzieht, und ist somit ein Maß für die Beschleunigung. Closed-loop-Beschleunigungsmesser besitzen eine exzellente Linearität, d. h. einen großen Messbereich ($\pm 20 g$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ist die Erdbeschleunigung), und eine sehr genaue Auflösung ($10^{-5} g$).

... schwere Masse

Leider gibt es neben der trägen Masse auch noch eine schwere Masse, die sich in einem bewegten System prinzipiell nicht von der trägen Masse unterscheiden lässt. Sprich: Setzt man Inertialmesssysteme für

1) s. Physik Journal, Juli/August 2003, S. 106

Dr. Ulrich Kilian, science & more redaktionsbüro, uk@science-and-more.de

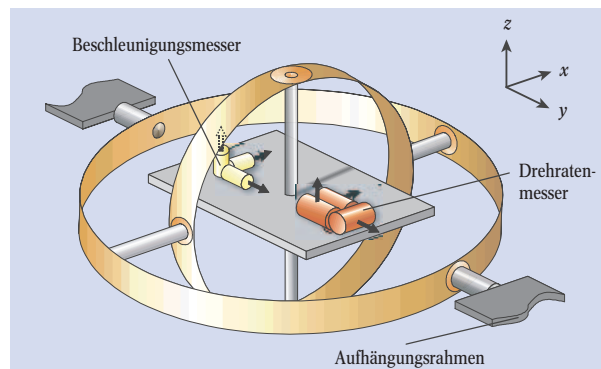


Abb. 2: Die Basiskomponenten eines Inertialen Navigationssystems (INS) sind die Beschleunigungsmesser (jeweils drei für die drei Raumrichtungen) sowie eine kardanische kreiselstabilisierte Aufhängung.

Navigationszwecke auf der Erde ein, wird die Erdanziehung immer mitgemessen; das Messsystem kann vertikale Fahrzeugbeschleunigungen und die Gravitationsbeschleunigung nicht voneinander trennen. Das bedeutet, dass die Gravitation als Korrektur berücksichtigt und rechnerisch durch ein analytisches Modell der Schwerebeschleunigung eliminiert werden muss.

Allerdings muss für diese Kompensation auch ständig die Orientierung des Körpers zum Erdschwerfeld bekannt sein. Diese Aufgabe kann dadurch gelöst werden, dass die Beschleunigungsbestimmung

In der Literatur werden solche Sensoren auch oft als „Kreisel“ (Gyroskop) bezeichnet, obwohl sie mit rotierenden Kreiselkörpern nichts zu tun haben. Je nach geforderter Genauigkeit werden zur Drehratenmessung unterschiedliche Sensortechnologien verwendet wie mikromechanische, piezovibrierende, dynamisch abgestimmte oder optische Kreisel, beispielsweise der Faserkreisel (Abb. 3). Er beruht auf einem Interferenzeffekt, den erstmals Georges M. M. Sagnac (1889–1928) 1913 dazu benutzte, den Nachweis der Erdrotation gegen einen hypothetischen Äther zu führen: Schickt man

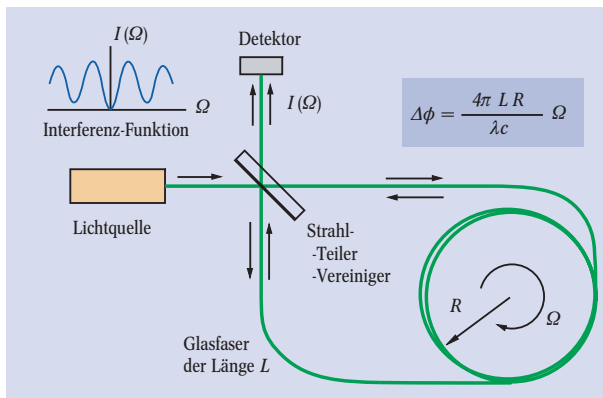


Abb. 3:
Prinzip des Faserkreisels:
Die Rotation der Anordnung mit Ω verschiebt die Phasen der beiden entgegengesetzt umlaufenden Lichtstrahlen.

auf einer kardanisch aufgehängten, kreiselstabilisierten Plattform stattfindet, die automatisch auf die örtliche Vertikale, d. h. parallel zur Erdoberfläche, ausgerichtet bleibt und damit eine der notwendigen Koordinatentransformationen zur Verarbeitung der Messdaten bereits mechanisch ausführt (Abb. 2). Man nutzt dabei also die Eigenschaft von rotierenden Kreiseln aus, ihre Achsrichtung im Raum beizubehalten. Entfernt sich die Plattform aus ihrer Solllage (beispielsweise durch die Reibung der Lager), fangen die Kreisel an zu präzedieren und steuern dadurch Motoren an den Aufhängungen, die die Plattform in die ursprüngliche Lage zurückbringen.

Der Lichtfaserkreisel

Verzichtet man auf die Plattform, verankert also die Beschleunigungsmesser fest im Fahrzeug, sodass sie alle Bewegungen mitmachen, spricht man von Strapdown-Systemen (von engl. strap down für festschnallen). In solchen Inertialmesssystemen muss aber jede Drehung des Fahrzeugs gemessen werden; zu den Beschleunigungsaufnehmern kommen also jetzt drei Drehratensensoren hinzu, um die Bewegung des Körpers in allen sechs Freiheitsgraden des Systems bestimmen zu können.

zwei entgegengesetzt umlaufende Lichtstrahlen durch eine Glasfaser-spule und rotiert die ganze Anordnung, dann verkürzt sich für den einen Strahl der Lichtweg, während er sich für den anderen verlängert; die entsprechende Laufzeitveränderung kann durch Interferenz detektiert werden und ist ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit der Drehung, deren Integration den Drehwinkel liefert. Optische Kreisel zeichnen sich dadurch aus, dass sie mechanisch nicht beansprucht und durch Beschleunigungen nicht beeinflusst werden und deswegen sehr präzise sind. Das ist in einem Strapdown-System auch sehr wichtig, weil sich jeder Winkelfehler aufgrund der daraus resultierenden fehlerhaften Erdschwerekompensation auf die Beschleunigungsmessung auswirkt. Bereits eine Abweichung von 2 Bogen Sekunden ($0,0006^\circ$) bei der Richtungsbestimmung des Erdschwerfeldes verursacht bei dessen Kompensation einen Fehler von $10^{-4} g$.

Inertialmesssysteme mit Lichtfasergyroskopen als Drehratensensoren werden beispielsweise in Flugzeugen eingesetzt und sind dort ein wichtiger Bestandteil des Autopilotensystems.

ULRICH KILIAN