

# DIS

... when it comes to motion analysis

---

Meßsystem zur inertialen kinematischen Vermessung

Stützung durch GPS und Odometer

iMAR GmbH  
Gesellschaft für inertielle Meß-,  
Automatisierungs- und Regelsysteme

Schlackenbergstraße 41  
D-66386 St. Ingbert  
Germany

Tel.: +49-(0)6894-9657-0  
Fax : +49-(0)6894-9657-22

[support@imar-navigation.de](mailto:support@imar-navigation.de)

Version 1.6 / November 1999

## 1 Prinzip der Stützung

Inertiale Meßsysteme erfassen i.d.R. das Bewegungsverhalten von Objekten durch Messung von Beschleunigungen (resp. Geschwindigkeitsinkremente) und Drehraten (resp. Winkelinkremente). Durch die Integration von Drehraten zu Winkeln unterliegen Kurs- und Lagewinkel somit durch Meßrauschen und stochastische Restfehler der Drehratensensoren stets einer Drift. Entsprechendes gilt auch für die Bestimmung von Geschwindigkeit und Position aus den gemessenen Beschleunigungsaufnehmern.

Die daraus resultierenden Meßunsicherheiten nehmen über der Meßdauer zu. Jedoch können diese reduziert werden, wenn man dem Meßsystem externe Stützinformatio- nen wie z.B. Fahrzeuggeschwindigkeit oder Positionsinformationen zur Verfügung stellen kann. Je genauer die externen Stützinformatio- nen sind, umso besser kann eine Driftkompensation erfolgen. Kriterien hierfür sind zeitliche Synchronisationsge- nauigkeit zwischen den Daten des Inertialmeßsystems und den Daten externer Stütz- information sowie die Wertgenauigkeit.

Das Prinzip der Stützung kann wie folgt veranschaulicht werden:

Eine Drift auf dem Roll-Kreisel bewirkt einen Rollwinkelfehler. Dieser bewirkt, daß der Fehler der Erdschwerekompensation der Querbeschleunigung mit der Zeit zunimmt<sup>1</sup>. Wenn nun die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit und die Kursdrehrate bekannt sind, so läßt sich aus der Schätzung des Erdschwerekompensationsfehlers der Rollwinkel- fehler aufgrund der Kreiseldrift bestimmen und korrigieren. Entsprechend kann auf der Nickachse (mit der vom Odometer gemessenen Geschwindigkeit) und der Gier- achse (mit des über GPS bestimmbaren Gierwinkels) verfahren werden.

### 1.1 Odometer-Stützung

Mit einem Meßrad kann bei Landfahrzeugen eine präzise Geschwindigkeitsinforma- tion zur Verfügung gestellt werden. Bei Wasserfahrzeugen verwendet man z.B. den Propellerzähler. Die Information wird digital (Pulse) eingespeist, wobei der Skalen- faktor (Meter/Puls) im INI-File eingetragen wird. Optional kann im User-Menu ein rela- tiver Skalenfaktor eingegeben werden, der sich z.B. aus einer Kalibrierfahrt mit be- kannter Distanz ergibt (Ergebnis z.B. aus Display oder Daten-Log-File entnehmen).

Es wird bei der Stützung angenommen, daß die Beschleunigung des Fahrzeugs voll- ständig über das Odometer bestimmt werden kann. Wenn das Fahrzeug zusätzlich z.B. starke Rollbewegungen durchführt (z.B. Schiff oder Motorradfahrer), so ist es ggf. günstiger, den Stützalgorithmus in einem weniger bewegten Punkt des Fahrzeugs zu rechnen (beim Schiff im Schwerpunkt oder beim Motorrad im Radaufstandspunkt auf der Straße).

---

<sup>1</sup> Im Idealfall (kein Rollwinkelfehler) wird die Erdschwere  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  im Meßwert des y- Beschleunigungsaufnehmers exakt kompensiert. Für kleine Rollwinkel führt ein Rollwinkelfehler  $\Delta\Phi$  zu einem Beschleunigungsfehler  $\Delta a_y \approx g \sin(\Delta\Phi)$ . Der Wert  $\Delta a_y$  kann aus der Differenz von Sensormeßwert und der über Geschwindigkeit  $v_x$  und Gierdrehrate bestimmten Querbeschleunigung bestimmt werden. Da diese Differenz jedoch stark verrauscht ist, kann sie mit der Filterkonstante  $\tau_1$  gefiltert werden.

Die Stützung arbeitet umso zuverlässiger, je besser die Fahrzeugbeschleunigung durch den externen Sensor (Odometer, Speed-Log o.ä.) bestimmbar ist. Erfahrungsgemäß ist dies umso besser erfüllt, je geringer die momentane Dynamik des Fahrzeugs ist. Daher gibt es ein einstellbares Kriterium, mit dem festgelegt werden kann, wann die Stützung aktiv ist oder wann sie automatisch deaktiviert wird. Hierzu können Schwellen (Threshold) für Drehrate, Beschleunigung und Winkelbeschleunigung festgelegt werden.

Ferner wird empfohlen, das Signal des Odometers (z.B. 400 Pulse/Meter) leicht tiefpaßzufiltern, da bei einer Abtastrate von z.B. 100 Hz jeder Puls nach Differentiation zu enormen positiven und negativen Beschleunigungspulsen führt. Die Filterzeitkonstante  $\tau_{\text{Vel}}$  [s] besagt, über welche Zeit die Geschwindigkeit vom Odometer mit einem Filter 1. Ordnung gefiltert wird (vgl. Kapitel 2).

Beispiel: Abtastrate  $F_a = 100$  Hz,  $\tau_{\text{Vel}} = 0.1$

Hieraus folgt  $\alpha_v = 0.9$

## 1.2 GPS-Stützung (kein kinematisches GPS)

Obwohl gewöhnliches GPS (satellitenbasiertes Ortungssystem) nur eine Genauigkeit von etwa 100 m aufweist, läßt sich GPS der Kurswinkel eines hinreichend schnell bewegten Fahrzeugs präzise bestimmen, da die Positionsfehler von GPS sich nur langsam über der Zeit ändern. Somit kann der GPS-Kurswinkel (Track) zur Stützung des Inertialmeßsystems verwendet werden. Außerdem kann GPS zur Bestimmung des Anfangskurswinkels vor der Ausrichtung nicht-nordsuchender Systeme eingesetzt werden. Dazu ist vor der Durchführung der Anfangsausrichtung eine hinreichend lange Strecke (z.B. 50 m) mit ausreichender Geschwindigkeit (z.B.  $> 40$  km/h) geradeaus zu fahren (Kurvenfahrt ist hierbei *nicht* zulässig, da GPS hier den Kurswinkel verzögert berechnet und der Fehler für die Anfangsausrichtung zu groß würde). Die Bestimmung des Kurswinkels über GPS erfolgt mathematisch durch die Bestimmung der Richtung der Geraden, die das Fahrzeug fährt, wobei vom GPS originär nur Positionsinformationen und keine Richtungsinformationen zur Verfügung stehen.

Im Menu wird signalisiert, ob der vom GPS ermittelte Kurswinkel gültig ist und für die Bestimmung des Anfangskurswinkels übernommen werden kann. Ein Abweichen von der vorgeschriebenen Geradeausfahrt bei geringen Geschwindigkeiten kann jedoch nicht mit ausreichender Genauigkeit überprüft werden! Die entsprechende Sorgfalt obliegt dem Anwender. Es ist zu beachten, daß ein ungenau bestimmter Anfangskurswinkel zu einer späteren fehlerhaften Kompensation der Erddrehrate und damit verbundenen fehlerhaften Meßwertausgaben (starke Nick- und Wankwinkeldrift, ggf. oszillierendes Verhalten bei Kreisfahrt) führen kann.

## 1.3 DGPS-Stützung (Standard-Lösung mit ALF-Stützung)

Mit DGPS (Genauigkeit 3 Meter innerhalb Deutschlands) läßt sich die Fahrzeugposition sehr genau bestimmen. Neben der GPS-Antenne ist eine zusätzliche miniaturisierte LW-Antenne auf dem mobilen Fahrzeug erforderlich. Da allgemein distributierte

Referenzdaten verwendet werden, muß der Anwender keine eigene Referenzstation installieren und betreiben. Die Lizenzgebühr zur Nutzung der Referenzdaten ist einmalig pauschal zu entrichten (über iMAR).

#### 1.4 DGPS-Stützung (kinematisches GPS)

Mit kinematischem DGPS (Genauigkeit im Zentimeterbereich) läßt sich das Inertialmeßsystem durch den Einsatz eines Optimalfilters (sog. Kalmanfilter) stützen (sog. INS/GPS-Kopplung). Derartige Verfahren sind sowohl in Echtzeit als auch im Post-processing einsetzbar. Die Art der Filterstruktur sowie dessen Parametrierung hängt sehr stark von der Applikation ab (vgl. Dokumentation zur INS//DGPS-Kopplung für geodätische Vermessungsaufgaben).

## 2 Stützungs-Modi (Aiding-Kriterien)

In den Inertialmeßsystemen werden verschiedene Stützungs-Modi zur Verfügung gestellt, die im INI.File ausgewählt werden können.

```
[DIS]
TauVel      = 0.1, 0.0          ; Filter time constant for averaging of odometer velocity
                                   ; and acceleration [sec](only, if odometer exists)
                                   ; TauVel affects only the aiding algorithms.
                                   ; THIS ENTRY SUBSTITUTES AlphaVelX, AlphaVDot !!!

[DIS Aiding]
Suspend     = No                ; Yes: keine Stützung im Meß-Mode
Krit        = 4                 ; Aiding criteria (0=never, 1=always, 2=acc<thres,
                                   ; 3=omg<thres, 4=2&3,5=domg/dt<thres ...)
DRate       = 0.1               ; Feedback damping rate d in 1/s
Tau1        = 5.0               ; Zeitkonstante fuer alpha_1 (Filterung des
                                   ; Winkelfehlers) in s
Tau2        = 0.2               ; Zeitkonstante fuer alpha_2 (Filterung der Acc/Omg
                                   ; für dyn. Kriterien Thres) in s
Delay       = 5., 3., 0.5       ; Aiding activation delays [s]
Threshold   = 2., 3., 0.3       ; Accel./rate/rate_deviation thresholds
                                   ; [m/s^2]/[deg/s]/[deg/s^2]
```

**Suspend:** Es kann gewählt werden, ob die Stützung nur nach der Ausrichtung (bis zum Beginn der Messung) oder stets (also auch im Meß-Modus) aktiv sein soll.

**Krit:** Wahl des Stützungs-Kriteriums in Abhängigkeit der Fahrzeugdynamik.

**DRate:** Rückführrate; Rückführanteil eines berechneten Winkelfehlers je Sekunde (bei  $f_A = 100$  Hz Abtastrate wird demnach je Sample  $1/100$ )

dieses bestimmten Winkelfehlerwertes zur Korrektur des Winkelfehlers zurückgeführt)<sup>2</sup>

- Tau1:** Zeitkonstante zur Glättung des berechneten Winkelfehlers im erdhorizontierten System [s]
- Tau2:** Zeitkonstante zur Glättung der Drehraten und Beschleunigungen vor Anwendung der Grenzwerte bzgl. Dynamikerkennung [s]
- Delay:** Verzögerungszeit, nach der die Stützung nach Unterschreiten der Grenzwerte für die zulässige Dynamik wieder aktiviert wird.
- Threshold:** Grenzwerte bzgl. Dynamik für das Kriterium *Krit*.

Die Filterung der Meßwerte (Glättung) erfolgt mit folgendem Ansatz:

$$x_{\text{Filter}}(k+1) = \alpha * x_{\text{Filter}}(k) + (1-\alpha) * x_{\text{Mess}}(k+1)$$

Die Zeitkonstante tau wird in Sekunden angegeben, wobei sich der Gewichtungsfaktor alpha wie folgt mit der Abtastdauer der IMU  $\Delta t$  berechnet:

$$B_{\text{Filter}} [\text{Hz}] = 1 / \tau = \frac{-\ln(\alpha)}{\Delta t} \quad \rightarrow \quad \alpha = \exp(-\Delta t / \tau)$$

Ggf. kann noch über ein weiteres Kriterium die Stützung des Kurswinkels durch GPS festgelegt werden (z.B. DIS.ADD für Jupiter-GPS-Empfänger).

```
Jupiter
2 4800
0.005 20.0 10.0
```

```
Zeile 1 = Jupiter
Zeile 2 = COM-Port (1..4), Baud-Rate zu Jupiter GPS
Zeile 3 = <d> <a> <v>
```

```
<d> = Daempfung der Stuetzung
<a> = max. zulaessige Abweichung [deg] zwischen IMU und GPS zur Uebernahme
      des GPS-Kurses als Gierwinkel
<v> = Mindestgeschw. [m/s], um GPS-Kurs zu akzeptieren
```

### 3 Definition der Hebelarme

Im INI-File können verschiedene Hebelarme definiert werden, die die Lage der externen Stützsensoren in Bezug auf die IMU definieren.

<sup>2</sup> Eindimensional könnte man vereinfacht für den Rollwinkel schreiben (wird mit jedem Abtastschritt ausgeführt):  
 $\Phi_{\text{kor}}(k+1) = \Phi_{\text{kor}}(k) - D_{\text{Rate}}/f_A * \Delta\Phi(k+1)$

```
[DIS Server]
RVeloc   = 1, 2, -2      ; Abstand des Geschwindigkeitssensors von der IMU [m],
                        ; koordiniert in IMU-Koordinaten
RCenter  = -3, 2, 1     ; Abstand der IMU zum Drehpunkt des bewegten Objektes
                        ; [m], koordiniert in IMU-Koordinaten
RVirt    = 2, 0, 1     ; Koordinaten eines virtuellen Meßpunktes [m], auf den die
                        ; Ergebnisausgaben bezogen werden
```