

# Gyrosensorik für Roboter

von Prof. Dr.-Ing. Detlef Brumbi, Deggendorf

## Zusammenfassung

- Die verfügbaren „Gyro“-Sensoren sind zu ungenau, um sie in der Robotik für die World Robot Olympiad (WRO) sinnvoll einzusetzen.
- Stattdessen ist auf einen möglichst guten Geradeauslauf des Antriebs und dessen Drehpräzision Wert zu legen, was sich mit Schrittmotoren fast ideal erreichen lässt.
- Restliche Abweichungen sind mit Mitteln wie Linienverfolgung, Wandverfolgung, mechanische Wandausrichtung auszugleichen.

## 1. Eigenschaften der Sensoren

Die heute als Gyrosensoren oder Gyroskope erhältlichen Module messen über die Coriolis-Kraft die Drehgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit in  $^{\circ}/s$ ) für gewöhnlich drei senkrecht zueinander stehende Achsen. Eine kurze physikalische Beschreibung findet man in:

<https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyroscope-magnetometer-arduino/#h-mems-gyroscope>

Technisch etwas detaillierter in:

<https://lastminuteengineers.com/mpu6050-accel-gyro-arduino-tutorial>

(Für die angegebenen Links und deren Inhalte übernehme ich keine Verantwortung)

Die ebenfalls erhältlichen Beschleunigungssensoren messen in drei senkrecht zueinander stehenden Raumrichtungen die Verschiebung einer Masse gegen eine Feder und damit direkt die Beschleunigung des Sensormoduls. Diese Funktion ist für die Drehwinkelmessung nicht geeignet.

Manche käufliche MEMS (Mikro Elektro-Mechanisches System) Sensormodule (z.B. der Typ MPU6050) besitzen integriert beide Sensorarten (so genannter „6-Achsen-Sensor“).

Beim Gyroskop ist die folgende wichtige Einschränkung zu beachten:

Um eine möglichst gute Genauigkeit zu erreichen, ist eine Sensor-Kalibrierung zu Beginn der Messreihe erforderlich. Dieser Vorgang dauert relativ lange (mehrere Sekunden). Eine Kalibrierung direkt vor dem Start ist nach den WRO-Wettbewerbsregeln nicht zulässig. Nach dem Start ginge zu viel Laufzeit verloren und eine Kalibrierung vor der Abgabe des Roboters auf dem „Parkplatz“ wäre weitgehend wirkungslos, da bis zum Start mehrere zehn Minuten vergehen können und die Drift zu groß ist. Zudem darf der Sensor während des Kalibrierprozesses nicht bewegt werden.

## 2. Winkelbestimmung

Allen Eigenschaften der Sensoren gemeinsam ist das Fehlen einer direkten Bestimmung des Objekt-Winkels im Raum oder über einer Ebene.

Eine genaue Winkelbestimmung in Bezug auf die Fahrebene ist in diesen Szenarien von Bedeutung:

- Bestimmung des Istwerts einer Drehung des Roboters (meistens 90° oder 180°).
- Gewährleistung eines exakten Geradeauslaufs des Roboters (Regelung auf einen konstanten Winkel).
- Orientierung des Roboters in Bezug auf das Spielfeld als Bezugssystem.

Ein „echtes“ Gyroskop (Kreiselkompass) könnte das leisten, ist aber zu groß, zu schwer und zu teuer.

Bei den in Kapitel 1 beschriebenen Sensoren muss der Drehwinkel  $\alpha$  mit Hilfe einer mathemati-

schen, zeitlichen Integration der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  ermittelt werden:  $\alpha(t) = \int \omega(t) dt$

Eine solche Integration ist jedoch recht fehleranfällig:

- Bei der üblichen digitalen Signalverarbeitung erfolgt die Integration zeitdiskret, d.h. die Sensorwerte stehen nur an gewissen Zeitpunkten (Vielfache des Abtastintervalls) zur Verfügung. Ändern sie sich zu schnell in Relation zum Abtastintervall, gehen eventuell wichtige Zwischeninformationen verloren.
- Alle temporären Abweichungen summieren sich im Laufe der Zeit, so dass z.B. bei einer Drehung und gleich großer Rückdrehung nicht der selbe Winkelwert wie am Anfang entsteht.
- Ein Offset des Geschwindigkeitswerts führt zu einer dauerhaften Drift des gemessenen Winkels.

Einige der öffentlichen Arduino-Bibliotheken für Gyrosensoren enthalten Winkel-Funktionen, die die erforderliche mathematische Integration der Winkelgeschwindigkeit beinhalten (s. Kapitel 5).

Eine Winkelbestimmung erübrigt sich jedoch, wenn die Bewegung des Roboters sehr präzise erfolgt:

- Der Geradeauslauf wird durch geeignete Regelungsalgorithmen eines Motors mit Winkel-Encoder sichergestellt oder Schrittmotoren werden synchron angesteuert.
- Auf gleiche Weise kann die Drehung relativ präzise ausgeführt werden. Die Auflösung des Radwinkels stellt jedoch eine Limitation dar:

- Verbaute Winkelencoder haben meist eine Auflösung von 1° bis 3.6° an der Achse.

- Die Schrittweite der Schrittmotoren beträgt gewöhnlich 0.9° oder 1.8°.

- Nach Gl. 8 im Dokument „Roboter-Physik“, Kapitel 3 gilt für den Roboter-Drehwinkel:

$$\alpha = \frac{Raddurchmesser}{2 \cdot Radabstand} \cdot Radwinkel \cdot \frac{Lenkwert}{50}$$

- Nehmen wir eine Radwinkel-Auflösung von 1° an, ergibt sich für eine typische Roboter-konstruktion (Raddurchmesser = 70 mm, Radabstand = 170 mm, Lenkwert L = 50 oder 100) eine Winkelabweichung von 0.2° (L = 50) bzw. 0.4° (L = 100).

- Eine gute Wiederholbarkeit setzt die genaue Kenntnis des Reifen-Auflagepunkts = Drehpunkts voraus. Bei breiten Reifen ist dieses häufig nicht der Fall. Außerdem kann sich der Drehpunkt je nach Massenverteilung (z.B. Transport von Objekten) ändern.

### 3. Anforderungen an die Winkelpräzision

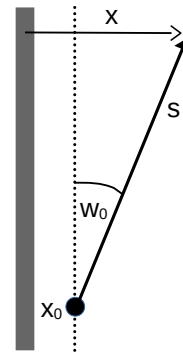
Betrachtet wird die Seitenabweichung durch einen Fehlwinkel  $w_0$ :

$$x = x_0 + s \cdot \sin w_0 \approx x_0 + s \cdot w_0$$

Winkel  $w_0$  in Radiant (Bogenmaß)  $\approx$  Winkel in Grad / 57

Liegt beispielhaft ein Fehlwinkel von nur  $1^\circ$  durch eine ungenaue Drehung vor, ergibt sich bei einer Laufstrecke  $s = 1$  m die Seitenabweichung  $x - x_0 \approx 1 \text{ m} \cdot 1/57 \approx 18 \text{ mm}$ .

Diese ist für die viele Roboteranwendungen, z.B. auf einem WRO-Spielfeld, nicht akzeptabel. Erforderlich wäre für viele Aufgaben eine maximale Abweichung von wenigen mm, was eine Winkelgenauigkeit von  $0.2^\circ$  erfordert.



Ohne aktive Regelungsmechanismen mit Bezug auf die Fahrumgebung (Linienverfolgung, Wandverfolgung, mechanische Wandausrichtung) ist diese Anforderung fast nicht erreichbar.

### 4. Geradeauslauf des Roboterantriebs

Viele Strecken beim WRO-Wettbewerb erfordern einen möglichst guten Geradeauslauf des Fahrroboters mit zwei Antriebsmotoren. Für Gleichstrommotoren ist eine Rückkopplung des Radwinkels (meist mit optischem Winkel-Encoder) erforderlich, um in einem Regelkreis den Gleichlauf zu erzielen, der durch die Qualität des Regelungsalgorithmus weitgehend beeinflusst wird. Dennoch wird immer wieder beobachtet, dass bei den kommerziellen Roboter-Baukästen kein ausreichender Gleichlauf erzielt wird.

Sehr gute Ergebnisse lassen sich grundsätzlich durch Schrittmotoren erreichen, die synchron angesteuert werden. Abweichungen können sich nur durch eine unvollkommene Bereifung ergeben – bei unterschiedlichem Verschleiß oder stark abweichender mechanischer Belastung infolge der Massenverteilung.

### 5. Praktische Ergebnisse des Gyrosensors MPU6050

In einem Experiment wurde der weit verbreitete Sensor MPU6050 horizontal auf einem Roboter montiert, der mit Drehbewegungen programmiert wurde.

Es wurde die Arduino-Bibliothek „IMU\_Fusion\_SYC“ mit der Funktion `getAngleZ()` benutzt. Zur Bestimmung des Winkels ist ein vorheriger Aufruf der Methode `Calculate()` erforderlich. Hier zeigte sich jedoch, dass ein einfacher Aufruf nach dem Drehen keinen plausiblen Wert lieferte.

Schaut man in die Bibliotheksfunktion `Calculate`, erkennt man, dass die erforderliche Integration der Winkelgeschwindigkeit intervallweise bei jedem einzelnen Funktionsaufruf erfolgt:

```
interval = (millis() - preInterval) * 0.001;
Gyro_AngleZ += gyroz * interval;
preInterval = millis();
```

Daher ist eine quasi-kontinuierliche Folge von Aufrufen notwendig, solange der Roboter sich dreht, z.B. durch:

```
while (robot.isRunning()) mpu.Calculate();
```

Bei 10 Durchläufen mit jeweils einer 180° Drehung im Uhrzeigersinn und Rückdrehung in die Ursprungsrichtung (mit Pausen von 1 s) ergaben sich absolute Winkelabweichungen des Gyroskops bis zu 7°. Bei Betrachtung der Einzelergebnisse (Differenz nach und vor *einer* Drehung) lagen die Winkelabweichungen etwa im Intervall  $\pm 1.5^\circ$ .

## 6. Fazit

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Gyrosensor für absolute Winkelmessungen ungeeignet ist. Selbst die relativ geringe Winkeldifferenz nach einer Drehung von  $\pm 1.5^\circ$  ist nicht zielführend. Bezug nehmend auf Kapitel 3 ist diese Unsicherheit in der WRO-Praxis unzureichend.

Erfahrungen mit Gyrosensoren der kommerziellen Robotik-Bausätze zeigen ein ähnlich düsteres Bild.

Ein mögliches Einsatzgebiet wäre das Ausbalancieren eines stehenden Roboters auf zwei Rädern, da für die dessen Regelung die Drehbewegung um die Radachse mittels der Winkelgeschwindigkeit detektiert werden kann.