

**2. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
25. bis 26. Feb. 1999 in
Darmstadt**



**„Autokalibrierungsverfahren für ein patientenfixiertes
Goniometer-Gyroskop-System zur Bewegungsmessung“**

Thomas Fuhr, Günther Schmidt
Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, München, Deutschland
E-Mail: thomas.fuhr@ei.tum.de, guenther.schmidt@ei.tum.de

ISBN: 318318317x
Pages: 71-72

Autokalibrierungsverfahren für ein patientenfixiertes Goniometer-Gyroskop-System zur Bewegungsmessung

Thomas Fuhr und Günther Schmidt

e-mail: {thomas.fuhr|guenther.schmidt}@ei.tum.de

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik

Technische Universität München, D-80290 München

Zusammenfassung - Die Messung der Gelenkwinkelgeschwindigkeit spielt bei der Regelung von Neuroprothesen für die unteren Extremitäten eine wichtige Rolle. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem Gyroskope mit Hilfe der Gelenkwinkelmessung automatisch kalibriert werden können und damit eine einfache, direkte Messung der Gelenkwinkelgeschwindigkeit ermöglichen.

Einleitung

Zur Regelung von Neuroprothesen der unteren Extremitäten spielt die Messung der kinematischen Zustände des Unterkörpers eine wesentliche Rolle [1]. Die Dynamik des Aufstehens, Stehens und Hinsetzens kann durch die Gelenkwinkel und Winkelgeschwindigkeiten um Fuß-, Knie- und Hüftgelenk in der Sagittalebene näherungsweise beschrieben werden.

Zur Messung der Gelenkwinkel werden häufig Elektrogoniometer verwendet. Die Ermittlung der Winkelgeschwindigkeit mittels numerischer Differentiation des Winkelsignals ist ein beliebtes Verfahren, bedarf jedoch zur Rauschunterdrückung einer anschließenden Tiefpaßfilterung, die die Nachteile einer Phasenverschiebung mit sich bringt. Wünschenswert ist deshalb die unmittelbare Messung der Winkelgeschwindigkeit, die seit der Verfügbarkeit kleiner, leichter und kostengünstiger Drehratengeber (Gyroskope) möglich ist. [1]

Ein piezoelektrisches Miniaturgyroskop der Firma Murata, Japan, wurde so an einem aus eigener Entwicklung stammenden Elektrogoniometer befestigt, daß die sensitiven Achsen der Sensoren übereinstimmen (vgl. Abb. 1). Das Gyroskop von Murata

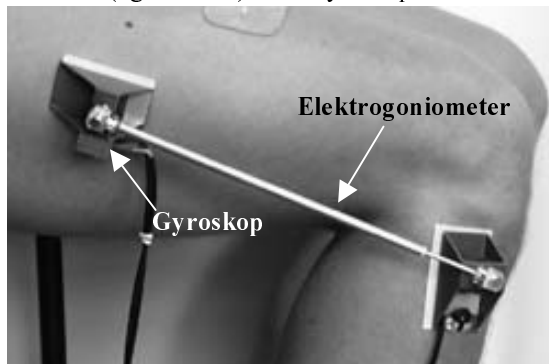


Abbildung 1: Am Knie befestigtes Goniometer-Gyroskop

weist eine starke Temperaturabhängigkeit auf und muß daher vor jedem Experiment neu kalibriert werden. Die dazu benötigte Kalibrierungsapparatur zur Bereitstellung definierter Winkelgeschwindigkeiten, etwa ein Drehtisch, ist sehr aufwendig. Es ist jedoch möglich, das Gyroskop mit Hilfe der Gelenkwinkelmessung automatisch am Patienten zu kalibrieren.

Dieses neue, in der Literatur bisher nicht bekannte Verfahren soll im folgenden vorgestellt werden.

Autokalibrierungsverfahren

Sei $x_1(t)$ Gelenkwinkel bzgl. raumfester Referenz

$x_2(t)$ Winkelgeschwindigkeit bzgl. raumfester Referenz

$y_2(t)$ Rohsignal Gyroskop

Die Meßgleichung für das Gyroskop lautet:

$$y_2(t) = b_2(t) x_2(t) + a_2(t) + \sigma_2 \quad (1)$$

\square_2 sei als weißes Rauschen angenommen, a_2 und b_2 ändern sich nur langsam. Der Gelenkwinkel ist nach einmaliger Kalibrierung des Goniometers bekannt. Da das Gyroskop die Winkelgeschwindigkeit im Raum mißt, das Goniometer jedoch den Gelenkwinkel, muß letzterer bezüglich einer raumfesten Referenz umgerechnet werden. x_1 wird durch eine einfache Transformation gewonnen. Der Gyroskop-Offset a_2 wird durch Messung des Gyroskopsignals in Ruhe bestimmt.

Da Goniometer und Gyroskop Bewegungen in der selben Ebene messen, muß gelten:

$$x_2 = \dot{x}_1$$

$$\Leftrightarrow \int_{t-\tau}^t \dot{x}_1 dt = \int_{t-\tau}^t x_2 dt \quad (2)$$

Die unbekannte Winkelgeschwindigkeit in Gl. (2) soll nun durch das bekannte Meßsignal des Gyroskopes nach Gl. (1) ersetzt werden:

$$\int_{t-\tau}^t \dot{x}_1 dt = \frac{1}{b_2} \int_{t-\tau}^t (y_2 - a_2 - \sigma_2) dt \quad (3)$$

Nach trivialen Umformungen erhält man:

$$[x_1]'_{t-\tau} = \frac{1}{b_2} \left([Y_2]'_{t-\tau} - a_2 \tau - \int_{t-\tau}^t \sigma_2 dt \right) \quad (4)$$

Hierbei ist $[Y_2]'_{t-\tau}$ das numerisch integrierte Gyroskopsignal und $[x_1]'_{t-\tau} = x_1(t) - x_1(t-\tau) = \Delta_\tau x_1(t)$ der während des Zeitraumes τ durchlaufene Winkel. Das Integral über \square_2 in Gl. (4) geht wegen des vorausgesetzten weißen Rauschens gegen 0.

Damit kann b_2 aus

$$b_2(t) = \frac{[Y_2]'_{t-\tau} - a_2\tau}{\Delta_\tau x_1(t)} \quad (5)$$

bestimmt werden, solange gilt:

$$\Delta_\tau x_1(t) \neq 0 \quad (6a)$$

$$|[Y_2]'_{t-\tau} - a_2\tau| \gg 0 \quad (6b)$$

$$|x_2(t)| < x_2^{\max} \quad (6c)$$

Die Nebenbedingungen nach Gl. (6) stellen sicher, daß b_2 und x_2 plausible Werte annehmen. Die Winkelgeschwindigkeit x_2 ergibt sich zu

$$x_2(t) = \frac{y_2(t) - a_2}{b_2} \quad (7)$$

und muß zuletzt wieder in die Gelenkwinkelgeschwindigkeit rücktransformiert werden.

Experimentelle Validierung

Zur Validierung des Algorithmus wurden an einem Probanden Goniometer-Gyroskope an Fuß-, Knie- und Hüftgelenk befestigt. Nach der Kalibrierung der Goniometer und der Ermittlung des Ruhe-Offsets der Gyroskope wurden mehrere Aufsteh- und Hinsetzbewegungen verschiedener Geschwindigkeit gemessen. Die Signale wurden mit einer Abtastrate von $f_s=200$ Hz erfaßt.

Nach einer kurzen Anlaufphase, in der die b_2 zum ersten Mal ermittelt wurden, konnten die Winkelgeschwindigkeiten on-line aus den Gyroskop-Meßsignalen ermittelt werden. Im vorliegenden Experiment wurden die b_2 alle 500 ms mit $\square = 75$ ms (15 Meßwerte) neu geschätzt.

Exemplarisch ist in Abb. 2 oben der Kniewinkelverlauf, sowie die numerisch differenzierte und ungefilterte Winkelgeschwindigkeit während einer Aufsteh- und Hinsetzbewegung dargestellt. In Abb. 2 unten ist die autokalibrierte Winkelgeschwindigkeit im Vergleich zum differenzierten und gefilterten ($f_c = 10$ Hz, Parks-McClellan FIR) Gelenkwinkelsignal aufgeführt. Die beiden Signale stimmen in ihrem Verlauf sehr gut überein, wobei das differenzierte Gelenkwinkelsignal gegenüber dem direkt erfaßten Geschwindigkeitssignal deutlich verzögert ist.

Diskussion

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht in einfacher Weise die Messung der Gelenkwinkelgeschwindigkeit mit Hilfe eines Gyroskops. Die Kalibrierung kann sehr einfach entweder einmalig zu Beginn eines Experiments nach Durchführung einer Referenz-

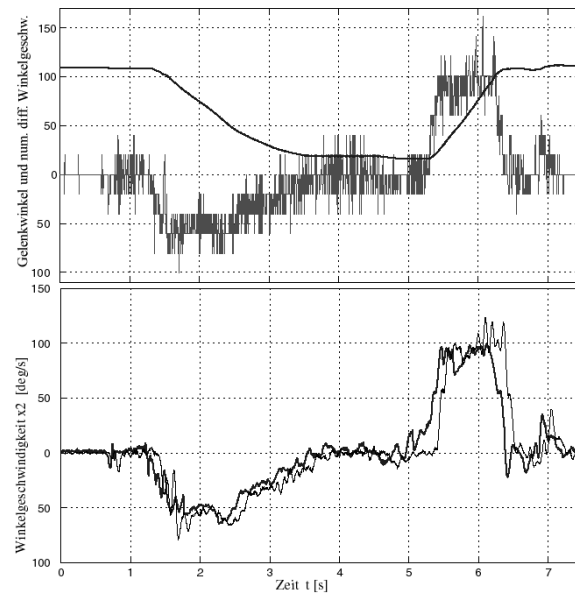


Abbildung 2: Oben: Kniewinkelverlauf und Winkelgeschwindigkeit und num. diff. Winkelgeschw. Unten: autokalibriertes Gyroskopsignal (fett) und FIR-gefilterter, differenzierter Kniewinkelverlauf (dünn).

bewegung oder, wie hier beispielhaft vorgeführt, in Intervallen automatisch während der Messung wiederholt werden. Zusätzlich ist es möglich, den Offset a_2 des Gyroskops in bewegungslosen Phasen, in denen b_2 wegen Gl. (6a,b) nicht Neuberechnet werden darf, erneut zu bestimmen und dort auftretende Temperaturdriften ebenfalls zu kompensieren.

Schwierigkeiten bereiten die momentan verfügbaren Miniaturgyroskope bezüglich ihres Meßbereichs, der bei dem hier verwendeten Gyroskop von Murata bei lediglich $\pm 100^\circ/s$ liegt und bei schnellen Aufstehbewegungen leicht überschritten wird (Abb. 2 unten, $t=6s$). In diesen Fällen (vgl. Gl. (6c)) muß die Autokalibrierung abbrechen und auf die numerische Differentiation des Winkelsignals zurückgegriffen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, daß in naher Zukunft Miniaturgyroskope mit größerem Meßbereich, die in verstärktem Maße auch von Anwendungen im Automobilsektor benötigt werden, auf dem Markt erhältlich sein werden.

Die hier vorgestellte Arbeit ist Teil der momentanen Aktivitäten zur Entwicklung eines patientenfixierbaren Multisensorsystems, von dem u.a. mit Beschleunigungsaufnehmern, Gyroskopen und Goniometern alle zur neuroprothetischen Regelung des unteren Bewegungsapparates notwendigen Größen erfaßt und aufbereitet werden sollen.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des SFB 462 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur

- [1] Veltink PH, et al. (1998) *Artificial and Natural Sensors in FES-Assisted Human Movement Control*. Proc. 20th Conf. IEEE EMBS: V-2247-2250.