

ANWENDUNG DER ZEICHENERKENNUNG IN DER PROZESSIDENTIFIZIERUNG

Von

A. BÁRSONY und Gy. LIPOVSZKY

Lehrstuhl für Prozeßregelung, Technische Universität, Budapest

Vorgelegt von Prof. Dr. A. FRIGYES

Eingegangen am 25. Juli 1976

Es liegt auf der Hand, die Eigenschaften der verschiedenen Signalübertragungsglieder durch Messung der Eingangs- und Ausgangssignale, und durch Verarbeitung dieser Meßdaten zu bestimmen. Die Anwendung dieser prinzipiell äußerst einfachen Methode stößt aber in der Praxis auf zahlreiche Schwierigkeiten.

1. Die Meßergebnisse enthalten Rauschen, weshalb die Signale als ein nichtstationärer stochastischer Prozeß zu betrachten sind, dessen statistische Eigenschaften nicht bekannt sind.

2. Die Herstellung der verschiedenen mathematischen Modelle, die die Systeme beschreiben, haben gewöhnlicherweise das Ziel, bei gegebenen Eingangssignalen die Ausgangssignale berechenbar zu machen. Deshalb ermöglichen die zur Identifizierung hergestellten Modelle meistens bloß komplizierte Algorithmen.

3. Die in der Praxis zur Verfügung stehenden Meßmöglichkeiten sind eingeschränkt, sie müssen gewöhnlich an laufenden Prozessen ohne Störung der Arbeit durchgeführt werden. Deshalb können diejenigen speziellen Eingangssignale, die eine Vereinfachung der Identifizierungsalgorithmen ermöglichen würden, nicht gebraucht werden.

Die Planung der Steuerungen bzw. die on-line-Rechnersteuerung setzt dagegen die Kenntnis der dynamischen Eigenschaften des geregelten (gesteuerten) Objekts voraus, im letzteren Falle tritt sogar auch der Anspruch auf, die langsame zeitabhängige Änderung der dynamischen Eigenschaften zu verfolgen, z. B. in adaptiven Systemen, die unter solchen Verhältnissen arbeiten. Infolgedessen kann auch eine weitere Schwierigkeit auftreten:

4. Die Ansprechzeit der Identifizierungsalgorithmen soll genügend kurz sein, damit der on-line-Eingriff möglich wird.

Unter Beachtung all dieser Gesichtspunkte bzw. Schwierigkeiten ist eine solche Kompromißlösung vorzuschlagen, die durch ihre Schätzungseigenschaften zwar suboptimal ist, aber in der Hinsicht der Rechenansprüche und bei Anwendung von Rechnern durch ihre Speicherungsansprüche und Ansprechzeit den konkreten praktischen Anforderungen entspricht.

Die konsequente Anwendung dieses Gedankenganges führt zu der Lösung, die jetzt — zur Veranschaulichung — für parametrische Schätzungsverfahren dargestellt wird. In nichtparametrischen Fällen kann das Verfahren nach einigen weiteren einfachen Überlegungen ebenfalls angewendet werden.

Charakterisieren wir den Prozeß mit dem n -dimensionalen Parametervektor \mathbf{p} . Zur Vereinfachung soll angenommen werden, daß die Elemente des Parametervektors unabhängig sind. In diesem Fall kann der Vektor in dem n -dimensionalen orthogonalen Koordinatensystem dargestellt werden, wobei an den Parameterachsen die einzelnen Parameter aufgemessen werden. Die meisten Identifizierungsverfahren betrachten diesen Parameterraum als kontinuierlich und setzen sich das Ziel, aus den Meßdaten der Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems den Endpunkt des Parametervektors zu bestimmen. (Das Wesentliche des Vorschlags wird dadurch nicht geändert, daß man diesen Punkt wegen verschiedener Einschränkungbedingungen im begrenzten Raumumfang des Parameterraums sucht.) Es ist das Wesentliche unseres Vorschlags, diskrete Punkte (in endlicher Anzahl) in dem durch die einschränkenden Bedingungen begrenzten Raumteil, sowie die bestimmten Umgebungen dieser diskreten Punkte so festzusetzen, daß diese Umgebungen

- a) eine disjunkte Menge bilden,
- b) den ganzen betrachteten Raumteil ausfüllen,
- c) einzelweise nur je einen festgesetzten Punkt enthalten.

Die so gewonnenen Bereiche werden im weiteren durch den in ihrem Innenraum befindlichen im voraus festgesetzten Punkt repräsentiert. Wenn also der Endpunkt eines mit einer beliebigen Identifizierungsmethode gewonnenen Parametervektors in irgendwelchem Bereiche liegt, dann wird der Parametervektor, der gegen den das Parameter charakterisierenden Punkt gerichtet ist, als Ergebnis der Identifizierung betrachtet. Auf diese Weise verwandelt sich das Identifizierungsproblem in ein Klassifizierungsproblem, und die Steuerungsalgorithmen können mit einer begrenzten Zahl von Parametervektoren arbeiten, die im voraus bekannt sind.

Natürlich ist es auch möglich, die charakterisierenden Parameterpunkte — nennen wir diese im weiteren charakteristische Punkte, und die in sie zeigenden Vektoren charakteristische Parametervektoren — sowie die die Bereiche begrenzenden Flächen (Entscheidungsflächen) mit einem Lernverfahren zu bestimmen. Dies bedeutet, daß die verschiedenen klassifizierenden, mustererkennenden bzw. Lernverfahren auch zu Identifizierungszwecken verwendet werden können. Die gewonnenen Ergebnisse werden natürlich im allgemeinen nur suboptimal sein, dadurch wird man aber einfache und schnelle Steuerungsalgorithmen gewinnen, die nur wenige Speicherzellen benötigen.

Zwei Beispiele sollen zur Illustrierung gegeben werden:

1. Die Übertragungsfunktion eines einfachen linearen zeitinvarianten Systems zweiter Ordnung ist:

$$W(s) = \frac{A}{1 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2} \quad (1)$$

Mit den üblichen Bezeichnungen:

$$\begin{aligned} a_1 &= 2 \cdot \zeta \cdot T \\ a_2 &= T^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Wenn das angewendete Identifikationsverfahren zur Berechnung der Koeffizienten a_1 und a_2 geeignet ist, so ist der „Parameterraum“ die Ebene der Parameter a_1 und a_2 . In den in der technischen Praxis vorkommenden Fällen sind a_1 und a_2 positiv, ebenso wie die Parameter T bzw. ζ . Aus der Gleichung (2) ergibt sich:

$$\begin{aligned} \ln a_1 &= \ln 2 + \ln \zeta + \ln T, \\ \ln a_2 &= 2 \cdot \ln T, \end{aligned}$$

das heißt

$$\ln a_2 = 2 \cdot \ln a_1 = 2 \cdot \ln \zeta - \ln 4 \quad (3)$$

Dementsprechend sind die Linien $T = \text{Konstante}$ bzw. $\zeta = \text{Konstante}$, dargestellt im zweimal logarithmischen Maßstabe, Geraden und ergeben die in Abb. 1 gezeigte Einteilung der Parameterebene. Beim Zeichnen der Einteilung wurde angenommen, daß zwischen den einzelnen Linien im voraus gewählte Werte $\Delta T = \text{Konstante}$ bzw. $\Delta \zeta = \text{Konstante}$ sind. Den sich ergebenden „Zellen“ wird je ein charakteristischer Vektor zugeordnet (in der Abbildung \mathbf{p} , $\mathbf{p}^T = [\ln a_1, \ln a_2]$), und so oft man als Ergebnis der Identifizierung solche Koeffizienten erhält, bei welchen der Endpunkt des aus ihnen berechneten Vektors \mathbf{p}_i ($\mathbf{p}_i^T = [\ln a_{1i}, \ln a_{2i}]$) im Bereich \mathbf{p} liegt, so wird dieser im voraus bekannten Vektor \mathbf{p} als Ergebnis der Identifizierung betrachtet und z. B. der im System enthaltene Regler wird diesem entsprechend eingestellt.

Nichts spricht natürlich dagegen, daß die Überschwingweite und die zum vorgegebenen prozentualen Wert gehörige Einstellzeit als technische Parameter betrachtet werden. In diesem Falle wird der Zusammenhang zwischen den Komponenten der Parameterebene anders sein, die Entscheidungsflächen und die charakteristischen Vektoren können aber auf ähnliche Weise aufgenommen und die Klassifizierung durchgeführt werden.

2. Das zweite Beispiel ist ein Identifizierungsverfahren zur Schätzung der Koeffizienten von linearen Differentialgleichungen bekannten Grades mit konstanten Koeffizienten.

Das Blockschema des Verfahrens ist in Abb. 2 zu sehen.

Das abgetastete Eingangs- bzw. Ausgangssignal der untersuchten Einrichtung wird der Rechenanlage als Meßergebnis zugeführt.

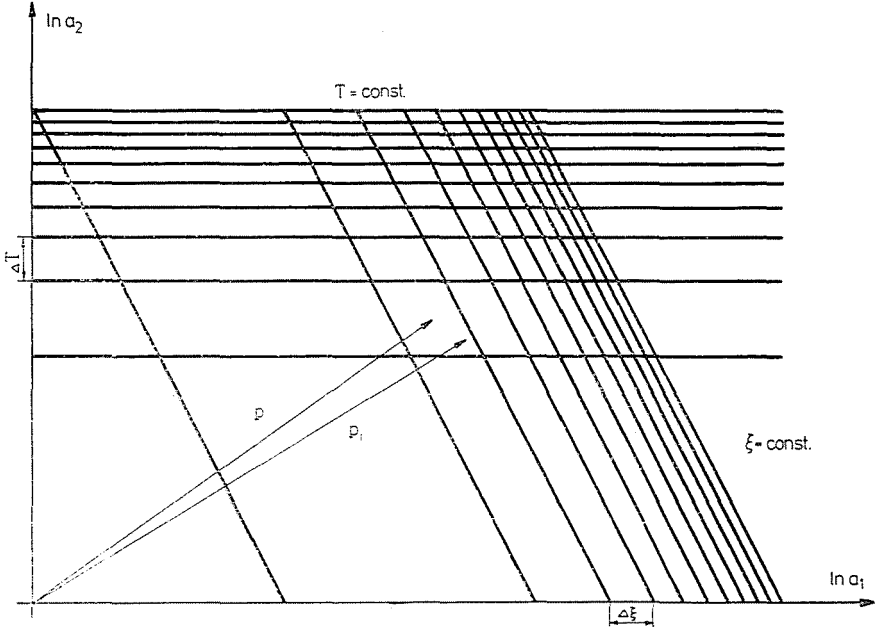


Fig. 1

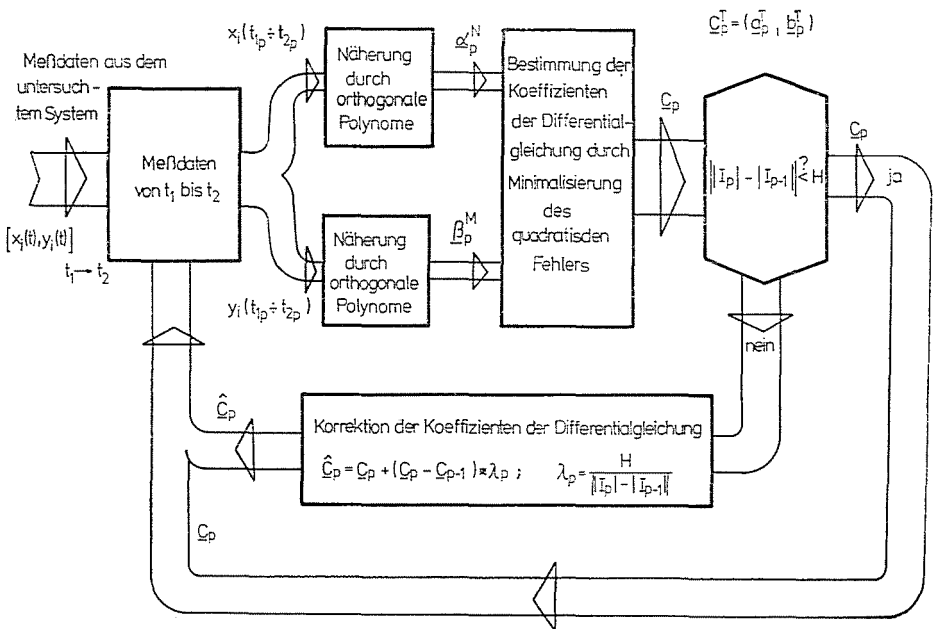


Fig. 2

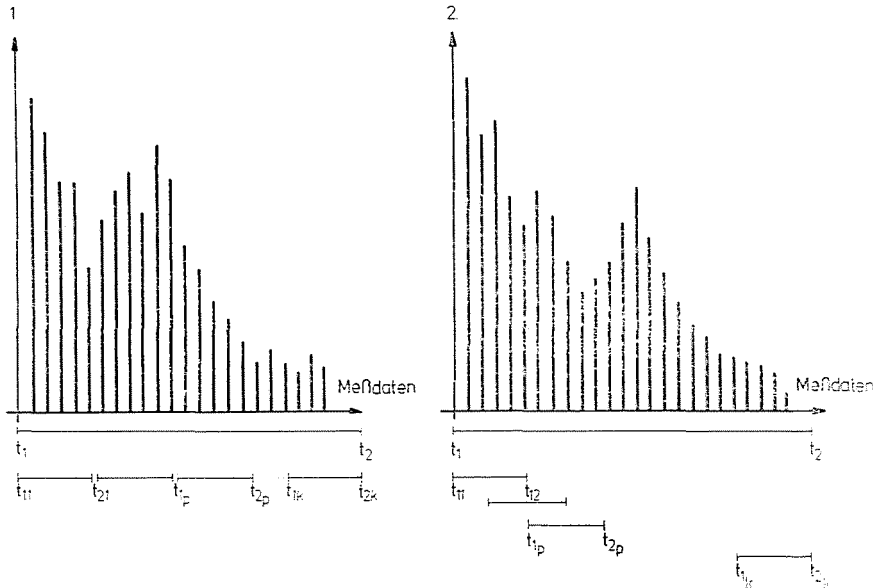


Fig. 3

Der erste Block des Verfahrens hat die Aufgabe, die Daten kontinuierlich zu speichern bzw. innerhalb eines im voraus bestimmten Zeitbereiches (des Bereichs t_1-t_2) gewisse Auswahlaufgaben zu versehen. Der Zeitbereich, der die Basis des Identifizierungsverfahrens bildet, kann auf zweierlei Weise ausgewählt werden (Abb. 3):

a) nacheinander folgende, voneinander unabhängige Datengruppen werden verarbeitet;

b) in einander überlappenden Zeitintervallen liegende Daten werden verwendet.

Aufgrund der Meßdaten wird nachher eine polynomiale Annäherung sowohl des Eingangs- wie auch des Ausgangssignals bestimmt (die im Tschebischew'schen Sinne am besten annähernden Polynome). Für das Rauschen bedeutet dies eine „Vorfilterung“. Bezüglich des Charakters und der statistischen Eigenschaften des Geräusches wird keinerlei Einschränkung angenommen. Die polynomiale Annäherung wird auf eine orthogonale Basis bezogen gesucht, z. B. im Falle des Ausgangssignals in folgender Form:

$$\hat{y}(\tau) = \sum_{k=0}^N \alpha_k \cdot B_{Nk}(\tau) \tag{4}$$

wobei $\hat{y}(\tau)$ polynomiale Annäherung der Meßergebnisse des Ausgangssignals im Orthogonalitätsbereich;

τ transformierte Zeitkoordinate, die dadurch entsteht, daß der Bereich der Realzeit in den Orthogonalitätsbereich transformiert wird;

$B_{Nk}(\tau)$ k -ten Element einer N -gradigen orthogonalen Basis;
 α_k Koeffizient.

Das Eingangssignal $\hat{u}(\tau)$ wird in einer Gleichung (4) ähnlichen Form gesucht. Die Koeffizienten werden mit β_k bezeichnet, und die höchste Gradzahl der orthogonalen Basis ist M . Es seien $\hat{u}_p(\tau)$ bzw. $\hat{y}_p(\tau)$ die polynomialen Annäherungen der Eingangs- und Ausgangssignale im p -ten Iterationsschritt und man nehme an, daß sie die folgende Differentialgleichung befriedigen:

$$\sum_{i=0}^n a_{pi} \cdot y_p^{(i)}(\tau) = \sum_{j=0}^m b_{pj} \cdot u_p^{(j)}(\tau), \quad (5)$$

wo $n > m$ = Ordnungszahl der Differentialgleichung,

a_{pi}, b_{pj} = die in der Differentialgleichung befindlichen Koeffizienten im p -ten Iterationsschritt.

Der obere Index bezeichnet die Differenzierung. Definieren wir die folgenden Vektoren:

$$\mathbf{a}_p^T = [a_{p0}, a_{p1}, \dots, a_{pi}, \dots, a_{pn}]$$

$$\mathbf{b}_p^T = [b_{p0}, b_{p1}, \dots, b_{pj}, \dots, b_{pm}]$$

$$\mathbf{y}_p^T = [y_p, y_p', \dots, y_p^{(i)}, \dots, y_p^{(n)}]$$

$$\mathbf{u}_p^T = [u_p, u_p', \dots, u_p^{(j)}, \dots, u_p^{(m)}]$$

und es seien

$$L(\mathbf{a}_p, \mathbf{y}_p) = \mathbf{a}_p^T \cdot \mathbf{y}_p \quad \text{und} \quad R(\mathbf{b}_p, \mathbf{u}_p) = \mathbf{b}_p^T \cdot \mathbf{u}_p,$$

dann kann die Differentialgleichung in der Form $L(\mathbf{a}_p, \mathbf{y}_p) = R(\mathbf{b}_p, \mathbf{u}_p)$ geschrieben werden. Die Parameter können durch Minimierung gemäß \mathbf{a}_p bzw. \mathbf{b}_p z. B. des Funktionals F geschätzt werden. Das Funktional F ist:

$$F = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (L(\mathbf{a}_p, \mathbf{y}_p) - R(\mathbf{b}_p, \mathbf{u}_p))^2 \cdot d\tau$$

Es ist zu bemerken, daß diese Methode auch im Falle gebraucht werden kann, wenn die Differentialgleichung nur in den Parametern linear ist. Das Ergebnis der Schätzung ist der Parametervektor $\mathbf{c}_p^T = \mathbf{a}_p^T, \mathbf{b}_p^T$. Die Parameterschätzung kann natürlich auch mit anderen Methoden durchgeführt werden.

Im Identifizierungsverfahren wird der Vektor \mathbf{c}_{p-1} als charakteristischer Vektor betrachtet, und als Qualitätskriterium wird z. B. das Funktional

$$I = \int_{t_1}^{t_2} (L(\mathbf{a}, \mathbf{y}) - R(\mathbf{b}, \mathbf{u})) \cdot dt$$

auf folgende Weise verwendet:

Es seien im p -ten Iterationsschritt

$$I_0 = \int_{a_{i_1}}^{t_{2p}} (L(\mathbf{a}_p, \mathbf{y}_p) - R(\mathbf{b}_p, \mathbf{u}_p)) \cdot dt$$

und im $(p-1)$ -ten Iterationsschritt

$$I_{p-1} = \int_{t_{1p}}^{t_{2p}} (L(\mathbf{a}_{p-1}, \mathbf{y}_p) - R(\mathbf{b}_{p-1}, \mathbf{u}_p)) \cdot dt$$

Es seien $+H$ und $-H$ die Entscheidung bestimmenden Punkte, wobei H eine voraus gewählte Grenze ist, und die Entscheidung sei

$$c_p = \begin{cases} c_{p-1} & \text{wenn } ||I_p| - |I_{p-1}|| < H \\ n_p \cdot (c_{p-1} + \lambda_p \cdot (c_p - c_{p-1})) & \text{übrigens;} \end{cases}$$

wo

$$\lambda_p = \frac{H}{||I_p| - |I_{p-1}||}$$

und n_p ein normalisierender Faktor ist, der sichert, daß der Absolutwert von c_p bzw. c_{p-1} gleich ist.

Abb. 2 zeigt die Blöcke, die die Parameterschätzungen bzw. die Entscheidung und die Parametermodifizierung durchführen. Nachher beginnt das Verfahren von neuem. In einem on-line-Falle wiederholt sich der Zyklus fortwährend (während der Betriebszeit) und in off-line-Falle kann ein Wert K (ganzzahlig) vorgegeben werden, der die Minimalzahl der keine Modifizierung beanspruchenden, nacheinander folgenden Schritte ist und die Beendigung das Verfahrens ermöglicht.

Die dargestellten Beispiele illustrierten, daß die vorgeschlagene Methode sowohl für on-line, als auch für off-line Identifizierung gebraucht werden kann. Die wichtigste Frage ist zu prüfen, wie die Wahl der Entscheidungsflächen und die Schätzungsfehler zusammenhängen. Diese Frage bildet den Gegenstand unserer derzeitigen Forschung.

Zusammenfassung

Diejenige Identifikationsmethoden, welche die Lösung in einem zusammenhängenden und geschlossenen Bereich des Parameterraums suchen, müssen zahlreiche praktische Schwierigkeiten bewältigen. Die Eigenschaften der Schätzung werden nicht besonders verschlechtert, wenn das Problem durch die Einleitung des Parameterraums in diskrete Zellen auf ein Klassifizierungsproblem zurückgeführt wird. Auf diese Weise kann eine suboptimale Variante mit kurzer Antwortzeit des eine Identifikationsprozedur enthaltenden on-line Regelungssystems realisiert werden. Gleichzeitig ermöglicht die Methode durch Benutzung von Lernprozessen auch eine solche Gestaltung der Identifikationsprozedur, welche optimale Schätzungseigenschaften besitzt. Dafür wird ein Beispiel gezeigt.

Dr. András BÁRSONY }
 György LIPOVSZKY } H-1521 Budapest