

Dr. Lothar Wenzel

Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei

Teil 12: Anwendungen der „Fortgeschrittenen Techniken“

Auch das aus den Teilen 10 und 11 dieser Artikelreihe bestehende Kapitel „Fortgeschrittene Techniken“ schließt mit Anwendungen der darin eingeführten Theorien – Wavelets, Joint-Time-Frequency Analysis und Bildverarbeitung – ab. Neben Beispielen, die sich mit den Einzelthemen befassen, gibt es auch Erläuterungen zu kombinierten Anwendungen.

Diesmal geht es um Beispiele, die sich auf Anwendungen von Wavelets, Joint-Time Frequency Analysis und Bildverarbeitung beziehen. Zwei dieser Applikationen verbinden die Bildverarbeitung mit den erstgenannten Disziplinen. Es gibt eine Fülle von Beispielen, da alle genannten Gebiete im Fokus sowohl der aktuellen Forschung als auch anspruchsvollerer Anwendungen liegen. Die hier gebotene Auswahl ist völlig subjektiv und spiegelt das persönliche Anwendungsspektrum des Autors wider.

Gerade Linien in Bildern

In Teil 10 der Serie [10] wurde im Rahmen der Behandlung von Bildverarbeitungsroutinen auch die Hough-Transformation kurz vorgestellt. In der meistverwendeten Form kann die Hough-Transformation in hervorragender Weise geradlinige Strukturen herausarbeiten. Je länger die zur Debatte stehende Strecke ist, um so stärker ist deren Aus-

prägung im Hough-Raum. Extreme Pixelwerte der Hough-Transformation lassen sich folglich direkt in Existenz von Linien und zugeordneter Lageinformationen umdeuten. Im übrigen ist man hier keineswegs nur auf Geraden beschränkt. Eine ähnliche Vorgehensweise hilft auch, falls es etwa um Kreise oder Kreisbögen geht. Einziger Unterschied: Die Menge der Parameter wird umfangreicher, was konsequenterweise zu höherdimensionalen „Bildern“ führt. So basiert die Hessesche Normalform für Geraden auf zwei Parametern (Distanz zum Ursprungspunkt und Winkellage), während man bei der Berechnung von Kreisen schon drei benötigt (x- und y-Komponente des Mittelpunktes sowie Radius des Kreises). Prinzipiell ist die Hough-Transformation in der Lage, jede parametrisierbare Kurvenschar sicher zu detektieren. Allerdings kann der Rechenaufwand hierfür zuweilen enorm sein. Im übrigen zählt die Hough-Transformation selbst im Falle der Erkennung von geraden Linien nicht gerade zu den superschnellen Algorithmen.

Paketprobleme

Das Lesen von Strichcodes (Barcodes) wird gut beherrscht. Allerdings setzt man hierbei zumeist auf die Mithilfe eines Bedieners. Beispielsweise bekommt der Kassierer in einem Supermarkt eine akustische Rückkopplung, wenn der Code vom System zweifelsfrei erkannt wurde. Ein Mensch setzt hierbei bewußt oder unbewußt alles in Bewegung, um den Leseprozeß möglichst unkompliziert zu gestalten.

Die Dinge sehen wesentlich verzwickter aus, wenn diese Art der Unterstützung nicht zur Verfügung steht. Als interessanter Anwendungsfall seien Pakete genannt, die in Sekundenschnelle an einer Kamera vorbeirauschen, wobei die Objekte etwa auf einem Förderband transportiert werden. Die eigentliche Herausforderung ist dann weniger die auf einem Laser beruhende Abtastoperation, vielmehr gilt es, den Ort des Strichcodes aufzuspüren. In einem zweiten

Gang kann dann das Herauslesen einer Information auf ziemlich sicherer Basis geschehen. Kompliziert ist der gesamte Ablauf schon deshalb, weil sich mehrere Strichcodes auf einem Paket befinden können, die Orientierung ist unklar, und zusätzlich können Verschmutzungen auftreten.

Strichcodes als geradlinige Perlenkette

Allerdings gibt es auch gute Nachrichten. Alle Strichcodes dieser Welt (es gibt übrigens mehrere verschiedene und gut etablierte Standards) haben etwas gemeinsam – sie



Bild 1. Strichcodes folgen, global gesehen, einem sehr einfachen Konstruktionsschema. Das läßt sich bei bestimmten Erkennungsproblemen ausnutzen.

bauen sich, sofern man von zweidimensionalen Varianten absieht, aus vollkommen parallel ausgerichteten Geradenstücken auf (Bild 1). Zurückkommend auf die Hough-Transformation folgt hieraus, daß sich Barcodes im Hough-Raum quasi als geradlinige Perlenkette, bestehend aus sehr hellen Spitzen (Peaks), abbilden werden. Jeder einzelne Strichcode generiert hierbei so-

zusagen eine eigene Perlenkette. Nun ist es so, daß die Erkennung von sehr selten auftretenden hellen Teilen in einer Bildszena wesentlich einfacher gelingt als die vergleichsweise schwer zu realisierenden direkten Detektionen des Strichcodes. Darüber hinaus besitzt man gleichzeitig exzellente Angaben zur dessen exakter Position.

Dabei ist zu bedenken, daß die Linien großer Helligkeit im Hough-Raum gerade dadurch zustande kommen, daß die Winkelinformation immer dieselbe ist. Veränderlich ist eigentlich nur der Abstand zum Ursprung, so daß in gewisser Hinsicht die gegenseitige Lage der hellen Peaks im Raum der Hough-Transformation eine direkte Entsprechung im darunterliegenden Strichcode hat. Allerdings wird zumeist die örtliche Auflösung nicht gut genug sein, um diese Interpretation vornehmen zu können. Das ist auch tatsächlich kaum notwendig, weil ein standardmäßiger Laserscanner alle Verdachtstellen unter die Lupe nehmen kann. Falsche Kandidaten bereiten hierbei keinerlei Probleme. Wenn der Laserscanner nichts an auswertbaren Informationen vorfindet, so verwirft man diese Stelle einfach.

Bild 2 demonstriert das Aufspüren von Strichcodes anhand eines Beispiels. Dies bereitet keine größeren Mühen, wenn man mit der Hough-Transformation arbeitet. Es sei nochmals wiederholt, daß letztere Transformation nicht zu den Sprintern unter den Algorithmen gehört. Allerdings kann ein Pentium II mit 400 MHz ohne weiteres ein 512×512 Pixel großes Bild im Sekundentakt transformieren. Dieser Wert resultiert nicht einmal aus Anwendungen mit hochgradig optimierten Implementierungen. Im Sinne von Echtzeit sind das allerdings eher schlechte Noten.

Chirp-Signale und Linien

Es dürfte einleuchten, daß man oft darum bemüht ist, eine zweidimensionale Problemstellung der Signalverarbeitung um eine Dimension zu erleichtern. Die daraus resultierende Rechenzeitersparnis ist einfach zu verlockend, als daß man darauf verzichten wollte. Es gibt auch Fälle, bei denen gar keine andere Wahl bleibt. Interessanterweise kann man aber ebenfalls der umgekehrten Strategie begegnen. Das hat in erster Linie etwas damit zu tun, daß man auf eine gut aufgebaute Theorie und Praxis im Höherdimensionalen zurückgreifen möchte. Existieren effiziente Tools, so sollte man sie im Bedarfsfall auch nutzen.

Ein Beispiel dafür ist die sichere Erkennung eines Chirp-Signals. In allgemeiner Form läßt sich dieses Signal mit Gleichung (1) beschreiben.

$$x(t) = A \cdot \sin(f(t) \cdot t) \quad (1)$$

Dabei repräsentiert $f(t)$ ansteigende Frequenzen im Sinne von Gleichung (2):

$$f(t) = f_0 + f \cdot t \quad (2)$$

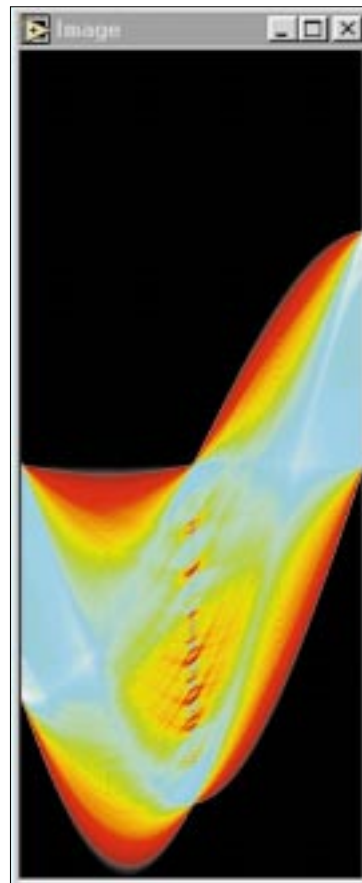


Bild 2. Gezeigt ist die Nutzung der Hough-Transformation beim Aufspüren eines Strichcodes innerhalb einer Szene. Die parallelen Strukturen des Barcodes bilden sich gut in der Hough-Transformation ab. Man erkennt das an der „Perlenkette“ in der Mitte des Bildes.

Alle Größen A , f_0 sowie f sind konstant. Beim Anhören derartiger Signale, beispielhaft basierend auf dem in Teil 1 der Serie [1] vorgestellten Programm SIGNAL, ergibt sich bekanntlich ein charakteristisch anschwellender Ton.

Liegt nun umgekehrt bereits ein Chirp-Signal vor, so ergibt sich die Frage, wie man die drei gesuchten Parameter ermitteln kann. Die Amplitudenbestimmung für A ist unproblematisch, da man hierfür einfach den Maximalwert von $x(t)$ zu messen hat. Schwieriger ist die Ermittlung der Frequenzkomponenten. Prinzipiell könnte man einen Fittingansatz wählen, und das würde sicherlich auch ganz gut funktionieren. Alternativ läßt sich jedoch auch die Short-Time Fourier-Transformation (STFT) nutzen, die noch den Vorteil mit sich bringt, daß sie genauso effizient bei komplizierten Modellen (Gl. 2) zum Einsatz kommen kann.

Short-Time Fourier-Transformation

Die Short-Time Fourier-Transformation (STFT) gehört zur umfangreichen Klasse der Joint-Time-Frequency-Operationen. Ziel ist es hierbei, in möglichst geeigneter Art und Weise Zeit- mit Frequenzinformation zu vereinigen und somit ein geschlossenes Bild über die konkrete Situation zu erzielen. Hintergrund ist der, daß so gut wie kein Signal der realen Welt absolut stationär ist. Demnach wird sich mit fortschreitender Zeit nicht nur die Signalform ändern, was ja offensichtlich ist, vielmehr sind auch abgeleitete Größen wie Leistungsspektren ebenfalls nicht konstant über die Zeit. Letzterem kann die STFT dadurch begegnen, daß mit einem im Verhältnis zur Gesamtdauer eines Signals relativ kurzen Abschnitt über das Signal quasi hinweg-

und (2) im Spektrum die Komponente mit der Frequenz bei $f(t)$ gut herausbilden. Ist $f(t)$ linear, so zeigt sich folglich in der STFT eine gut ausgebildete gerade Linie, deren Ausdeutung basierend auf Gl. (2) unschwer gelingt. Man bedenke hierbei, daß alle anderen Frequenzanteile im Rauschen quasi untergehen. Das bringt einen angenehmen Seiteneffekt mit sich.

So könnte man die geradlinige Struktur innerhalb der STFT natürlich mit der Hough-Transformation herausarbeiten. Allerdings ist das hier kaum notwendig, weil faktisch ein binäres Bild von der STFT produziert wird. Die Vermessung derartiger Strukturen bereitet naturgemäß keine großen Schwierigkeiten, und man kann sich den Einsatz komplizierter und hierdurch zeitaufwendiger Mittel ersparen.

Liegt ein von Gl. (2) verschiedenes Modell vor, so wird sich in der STFT nicht die geradlinige Struktur zeigen. In jedem Fall bekommt man aber Hinweise auf die wahre Zeitabhängigkeit der Frequenz geliefert. Man vergleiche hierzu nochmals Bild 3.

„Ins Innere sehen“

Der Begriff Tomografie ist natürlich allgegenwärtig. Im Mittelpunkt stehen hierbei Anwendungen in der Medizin und auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung. Tomografie in letzterer Disziplin ist übrigens weit mehr verbreitet als man glaubt. Kauft man beispielsweise einen Gegenstand aus Glas, so bringt man ihn in verschiedene Positionen, um verdeckte Schwachstellen aufzuspüren. Unbewußt produziert man hierbei so etwas wie ein dreidimensionales Abbild der Realität. Wenn man dann noch zusätzlich mit dem Finger gegen ein Glas schnippt, so benutzt man die Signalverarbeitung

nochmals, allerdings basierend auf eindimensionalen Datensätzen. So theoretisch kann der Alltag aussehen!

In der wohl bekanntesten Ausprägung versucht die Tomografie, Schnitte in Gegenstände zu legen, die man in Wirklichkeit gar nicht zerschneiden darf. Um hier von einem konkreten Beispiel auszugehen, sei ein zylinderförmiges Objekt gegeben, das im Innern Fehler aufweisen kann. Gutes Material unterscheidet sich von fehlerhaftem durch Dichteunterschiede. Sendet man Röntgenstrahlen durch das Objekt, so wird sich auf dem Film (heutzutage hat man auch oftmals bereits direkte bildgebende Verfahren im Einsatz) ein entsprechender Effekt zeigen.

Hat der Röntgenstrahl einen kritischen Bereich durchwandert, so wird sein Schwächungsverhalten anders als im optimalen Fall aussehen. Dabei spielt es weniger eine Rolle, ob die Schwächung infolge von Inhomogenitäten größer oder kleiner ist, entscheidend ist der Unterschied zwischen beiden Situationen. Wie im täglichen Leben dürfte auch bei der Prüfung von Objekten das Gute die Oberhand besitzen, so daß fehlerhafte Stellen eher die Ausnahme sind.

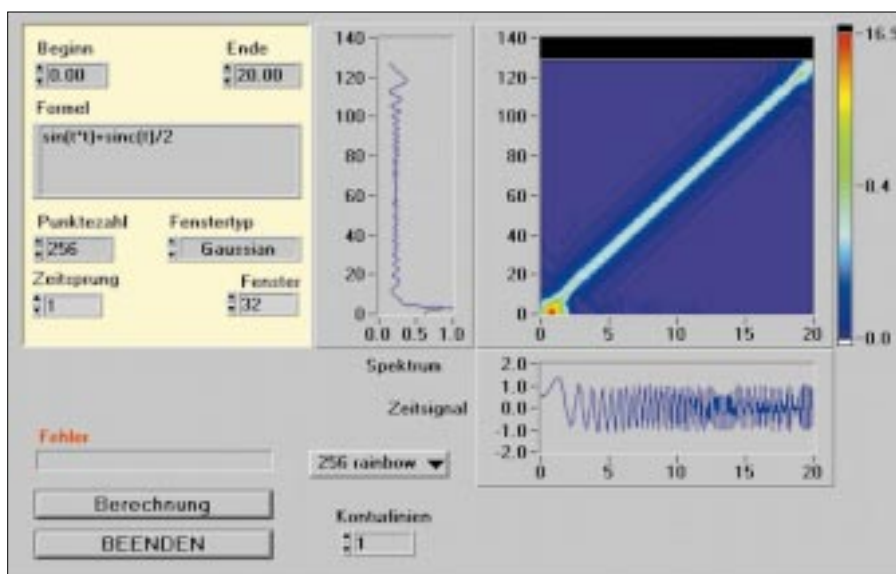


Bild 3. Ein Beispiel für eine Short-Time Fourier-Transformation anhand des Programms „STFT“. Entscheidend ist das Wechselspiel zwischen zeitlichen Informationen und Frequenzkomponenten.

gelaufen wird. Hierbei werden ständig Fourier-Transformationen ausgeführt. Der entsprechende Abschnitt ist auch unter der Bezeichnung „Fenster“ bekannt.

Auf diese Art und Weise kann man zu jedem gegebenen Zeitpunkt ein ganzes Spektrum erzeugen. In der Praxis begnügt man sich zumeist mit nicht extrem hoher Auflösung sowohl in zeitlicher Hinsicht als auch bezüglich der Frequenzen. Ersteres erlaubt ein Springen des Fensters, letzteres wird durch die Länge des Fensters bestimmt. Bei ungeschickter Wahl erhöht sich die Rechenzeit sonst gewaltig.

Die Verbindung zur höherdimensionalen Signalverarbeitung wird dadurch hergestellt, daß man das Leistungsspektrum (d.h. die Amplitudenwerte) über der Zeit aufträgt (Bild 3). Es entsteht ein Objekt, das im Rahmen dieser Serie bereits aufgetaucht ist. Bei entsprechender Normierung läßt sich das Ergebnis einer STFT nämlich als ein Grauwertbild interpretieren.

Bleibt die Frage zu klären, welche STFT-Bilder von Chirp-artigen Signalen produziert werden. Die Antwort ist nicht schwer. Zum Zeitpunkt t wird sich gemäß den Gl. (1)

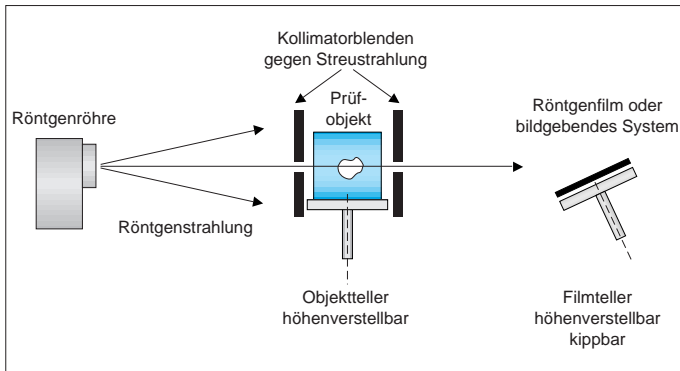


Bild 4. Vereinfachtes Prinzip einer einzigen Tomografie-Aufnahme, bei der man Informationen über eine sehr dünne Scheibe im Inneren des Objektes gewinnen kann.

Baut man das geschilderte Szenario passend aus, so kann man quasi mit einer einzigen Aufnahme eine linienartige Projektion der wahren Gegebenheit im Innern eines Körpers gewinnen (Bild 4). Im Grunde genommen hat man somit Informationen über eine dünne Scheibe des zylindrischen Objektes ermittelt. Würde man vollkommene Klarheit über die Gegebenheiten dieser Scheibe haben, so hätte man gewonnen, weil man ja mit derselben Methode jede andere Ebene des Zylinders ebenfalls erkunden könnte. Unglücklicherweise kann eine einzige Projektion zwar bis zu einem gewissen Grad Hinweise geben, aber wirkliche Präzision ist damit keinesfalls erreichbar (so können etwa bestimmte Fehlstellen andere „abschatten“). Die Tomografie antwortet auf diese Herausforderung mit einer ganzen Serie von Projektionen, die es nur passend zu kombinieren gilt.

In Situationen wie der vorliegenden produziert man solche Serien dadurch, daß man den Zylinder auf einem Teller frei dreht und fortlaufend Aufnahmen nimmt. Äquivalent dazu ist die Vorstellung, daß die Röntgenquelle das Objekt umrundet. Da hier der Vorgang der Tomografie simuliert werden soll, ist letztere Vorstellung sogar bequemer. Bleibt die Frage zu klären, inwiefern die Signalverarbeitung hierbei Hilfestellung geben kann.

Tomografie und Signalverarbeitung

Tatsache ist, daß das sogar in mannigfacher Weise geschieht. Das fängt schon damit an, daß alle Prozesse in Verbindung mit Röntgenstrahlen äußerst rauschbehaftet sind. Das ist übrigens der Grund für die relativ langen Belichtungszeiten bei konventionellen Röntgenaufnahmen. Die Statistik kann hierbei nur dadurch auf solide Füße gestellt werden, indem man ausreichend viele Photonen in Richtung Film sendet. Bei direkten bildgebenden Verfahren nimmt die Zufallskomponente zuweilen dramatische Formen an. Als minimale Gegenmaßnahme müssen dann aufeinanderfolgende Bilder gemittelt werden (typischerweise 64 Bilder mit 30 Aufnahmen je Sekunde). Bei bestimmten Aufgaben kommt man um kompliziertere Werkzeuge nicht herum. So ist der zweidimensionale Wiener-Filter äußerst wertvoll, wenn es gilt, Röntgenbilder von Störeffekten und Einflußfaktoren zu befreien.

Die Kernroutinen der Tomografie erfordern selbstverständlich auch spezielle Algorithmen. In den zurückliegenden Jahrzehnten wurden zahlreiche Routinen entwickelt. Einige davon stützen sich zum Beispiel auf die zweidimensionale Fourier-Transformation, für die es ja bekanntlich effiziente Berechnungsvorschriften gibt. Überhaupt ist Geschwindigkeit von großer Bedeutung im Tomografie-Geschäft.

Es fallen große Datenmengen an, die es gilt, möglichst in Echtzeit in gewünschte Informationen umzuarbeiten. Da die Daten zeitlich nacheinander eintreffen, besteht eine elementare Forderung an gute Tomografie-Verfahren darin, daß sie losrechnen können, sobald die ersten Informationen vorliegen. Bis zum heutigen Tag wird übrigens ein großer Teil der zeitaufwendigen Routinen in der Tomografie von speziellen DSPs erledigt.

Die Natur kann rechnen

Der wohl einfachste Algorithmus zur Umsetzung der beschriebenen Tomografie-Problematik verlangt übrigens nur ein Mindestmaß an Rechenkraft. Die Genauigkeit dieses Verfahrens kann nicht mit den Klassenbesten konkurrieren, aber das Prinzip überzeugt allemal. Im Grunde genommen benötigt man nicht einmal einen Computer, um die erforderlichen Kalkulationen auszuführen. Wie in Bild 5 angedeutet, genügt es bereits, während des Umlaufs des Zylinders den Film fortlaufend zu belichten. Was hierbei entsteht, ist ein ziemlich exaktes Abbild der wirklich vorhandenen Fehlersituation in der gerade betrachteten Ebene des Zylinders.

Aus signaltheoretischer Sicht geschieht hierbei folgendes. Man verteilt das Ergebnis einer jeden Projektion gleichmäßig auf jeden potentiellen Verursacher. Der Röntgenstrahl wird dabei sozusagen künstlich zurückverfolgt. Natürlich ist das ungerecht, weil auch Unschuldige ihren

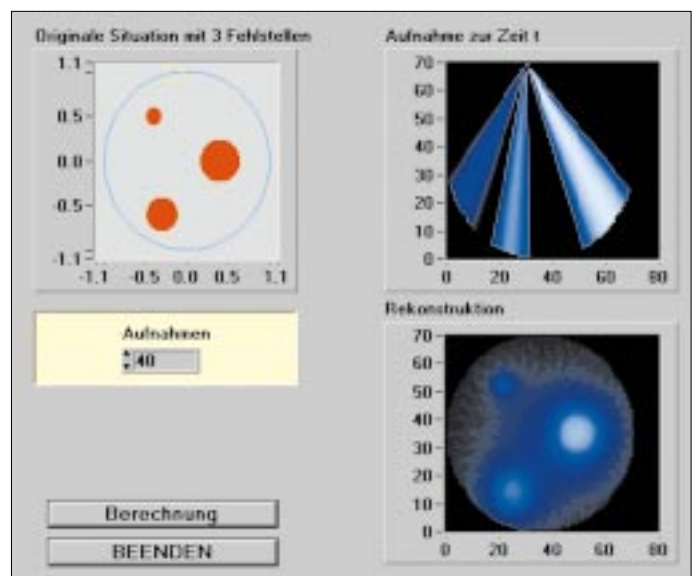


Bild 5. Momentaufnahme nach der Arbeit des Programms „TOMO“. Die wahre Fehlergeometrie hat sich augenscheinlich gut herausgebildet (rechts unten).

Teil abbekommen. Allerdings bedenke man, daß das nicht zu oft geschieht, da ja alle denkbaren Projektionen in diesem Sinne behandelt werden. Der Effekt, daß Fehler bei dieser Rückwärtsstrategie immer bestraft werden, eigentlich fehlerfreie Stellen jedoch nur von Zeit zu Zeit, läßt die wirklichen Verhältnisse durch einfache Aufsummierung klar hervortreten. Will man noch bessere Ergebnisse erzielen, sollte man die „Bestrafung“ eines inneren Punktes noch von der zu durchlaufenden Wegstrecke des Röntgenstrahls abhängig machen (Schwächungseffekte).

Das Programm TOMO simuliert exakt diese Methode, wobei drei kreisförmige Inhomogenitäten in der Zylinderscheibe vorgegeben sind (Bild 5). Das Programm arbeitet schritthaltend, d.h., der Aufsummierungsprozeß findet ständig statt. Beim Ablauf wird sich demnach die wahre Fehlergeometrie mit fortschreitender Zeit immer besser zeigen. Ein anderer Umstand ist ebenfalls bemerkenswert. TOMO verfügt über die Eingangsgröße „Winkel.“ Hierunter ist der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen zu verstehen. Beim Experimentieren erweist es sich als richtig, daß man keinesfalls im Gradschritt Aufnahmen benötigt. Springt man jeweils 15 Grad weiter, gelingt bereits eine sehr gute Rekonstruktion der wahren Gegebenheit. Auswirkungen auf das potentielle Risiko für Patienten oder auf den Preis von Tomografie-Aufnahmen dürften naheliegen.

Alte Hüte ...

In Teil 10 dieser Serie wurde etwas zum Thema Wavelets gesagt. Hier sei noch einmal etwas zum theoretischen Hintergrund dieser Idee wiederholt: Viele Jahrzehnte glaubte man, daß man mit der Fourier-Transformation bereits alles über die Zerlegung von gegebenen Funktionen wußte. Der große Vorteil der Fourier-Transformation ist nicht der, daß dahinter ein sogenanntes orthonormales System steckt, im konkreten Fall bestehend aus Cosinus- und Sinusfunktionen. Viele andere Systeme erfüllen das auch. Jedoch ist die Fourier-Transformation exzellent darin, daß die Cosinus- und Sinusfunktionen einen extrem scharfen Spitzenwert (Peak) im Frequenzraum besitzen. Aus signaltheoretischer Sicht ist aber sowohl ein hoher Grad an Lokalisierung im Zeit- als auch im Frequenzbereich wünschenswert. Bis zur Entdeckung der Wavelets schien es so zu sein, daß man nicht beides gleichzeitig haben kann.

Man kann nun sagen, daß eine enge Beziehung zwischen den Sinus-/Cosinusfunktionen und der Fourier-Transformation vorliegt. Eine ebensolche Relation besteht zwischen einem vorgegebenen Mother-Wavelet und der zugeordneten Wavelet-Transformation. Indirekt ist hiermit bereits angedeutet, daß es sogar zahlreiche verschiedene Wavelet-Systeme gibt. Grundlegend kann man beliebig glatte Mother-Wavelets produzieren, man verliert auf der anderen Seite allerdings den Grad der Kompaktheit in zeitlicher Hinsicht (Lokalisierung). Je glatter das Mother-Wavelet ist, um so ausgebreiteter ist es in der Zeit. Da man sowohl an Glattheit von Wavelets als auch am hohen Lokalisierungsgrad interessiert ist, läuft alles auf einen geeigneten Kompromiß hinaus, der oftmals erst an der konkreten Anwendung festgemacht werden kann.

... aufgemöbelt

Die Anwendungsbreite der Wavelets ist enorm und noch keinesfalls vollständig ausgelotet. Nimmt man die Eigenschaften von Wavelets zusammen, d.h. hohe Lokalisierung sowohl im Zeit- als auch im Spektralbereich, so ist beispielhaft die Eignung für eine bestimmte Art von Problemen fast offensichtlich. Man denke an eine alte Schallplattenaufnahme, die nicht selten beim Anhören gerade ein Abbild von Kratzern darstellt. Derartige Kratzer sind zeitlich von extrem kurzer Dauer und entziehen sich somit vollkommen dem Zugriff etwa durch die Fourier-Transformation. Wavelet-Transformationen können mit diesem Umstand viel besser umgehen. Die Vorgehensweise sieht hier so aus, daß man in der Wavelet-Transformation eines Stückes der alten Plattenaufnahme bestimmte Koeffizienten unterdrückt und das Resultat zurücktransformiert. Bei geeigneter Wahl dieser Koeffizienten gewinnt die Aufnahme deutlich an Qualität und ist praktisch kratzerfrei.

Der letzte Teil dieser Serie beschreibt eine komplette Fallstudie, die auf zahlreiche der vorgestellten Ansätze Bezug nimmt. Genauer geht es um das Problem des „Pattern Matching“ in Bildern. gs

Literatur

- [1] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 1. *Elektronik* 1998, H. 23, S. 96ff.
- [2] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 2. *Elektronik* 1998, H. 25, S. 86ff.
- [3] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 3. *Elektronik* 1999, H. 1, S. 52ff.
- [4] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 4. *Elektronik* 1999, H. 3, S. 48ff.
- [5] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 5. *Elektronik* 1999, H. 5, S. 60ff.
- [6] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 6. *Elektronik* 1999, H. 7, S. 58ff.
- [7] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 7. *Elektronik* 1999, H. 9, S. 62ff.
- [8] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 8. *Elektronik* 1999, H. 11, S. 62ff.
- [9] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 9. *Elektronik* 1999, H. 13, S. 91ff.
- [10] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 10. *Elektronik* 1999, H. 15, S. 64ff.
- [11] Wenzel, L.: Digitale Signalverarbeitung ist keine Hexerei, Teil 11. *Elektronik* 1999, H. 17, S. 62ff.
- [12] Die im Rahmen dieser Serie angegebenen Programme stehen zum Download bereit unter: www.natinst.com/germany

Dr. Lothar Wenzel ist gebürtiger Berliner und hat Mathematik und Informatik in Greifswald und Dresden studiert. Nach Tätigkeiten in einem Kernkraftwerk und bei der BASF AG, Ludwigshafen, beschäftigt er sich z.Zt. bei National Instruments in Austin, Texas, mit dem Design von Algorithmen auf den Gebieten Simulation, Regelung, Mathematik und Bildverarbeitung.

