Neuer Datensprinter für Echtzeit-Bildverarbeitung : Sysama-2-Rechnermodul für schnelle Bildtransformationen, Filtrierung und Korrelation

Autor(en): **Hiltebrand, Edi**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **85 (1994)**

Heft 9

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902559

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Das am Institut für Elektronik der ETH Zürich entwickelte modulare Echtzeit-Bildverarbeitungssystem Sydama-2 ist im Bulletin SEV/VSE vor einiger Zeit eingehend beschrieben worden. In der Zwischenzeit hat der Sydama-2 in mehreren Anwendungen seine Tauglichkeit bewiesen. In diesem Beitrag wird nun ein neues Hochgeschwindigkeits-Bildverarbeitungsmodul beschrieben, welches die Funktionen geometrische Bildtransformation, Filtrierung von Bildern und Berechnung von Korrelationen auf einem Print vereinigt. Die Rechenzeit liegt dabei bei Bildgrössen von 512 x 512 Pixel unter 10 ms, was einer Rechenleistung vom mehr als 1000 MIPS entspricht.

Neuer Datensprinter für Echtzeit-Bildverarbeitung

Sydama-2-Rechnermodul für schnelle Bildtransformationen, Filtrierung und Korrelation

■ Edi Hiltebrand

Das am Institut für Elektronik der ETH Zürich entwickelte Echtzeit-Bildverarbeitungssystem Sydama-2 ist im Bulletin SEV/VSE bereits beschrieben worden [1; 2]. Seit damals sind diverse Zusatzmodule entwickelt worden, unter anderem ein Signalprozessormodul mit einem Gleitkomma-DSP, ein Kirschfiltermodul, ein Histogrammprozessor, ein FIR-Filter, ein Median-Filter und das Modul zur schnellen Berechnung von geometrischen Bildtransformationen [3] (Warping).

Das letztgenannte Modul nimmt unter diesen Modulen insofern eine Sonderstellung ein, als es mit Abstand das aufwendigste und komplexeste Modul mit der höchsten Taktrate und Verarbeitungsleistung ist. Es wurde in gemischter SMD und Through Hole-Technik auf einer 220 x 234 mm² grossen Multilayer-Platine mit etwa 100 hochintegrierten CMOS-Bauteilen aufgebaut. Da für die schnelle Berechnung einer geometrischen Bildtransformation ohnehin ein sehr grosser Aufwand betrieben werden musste, wurde versucht, die Schaltung so universell wie möglich zu gestalten. Sie sollte auch in der Lage sein, eine Filtrierung von Bildern und die Berechnung von Korrelationen, wie sie für die Verfolgung von bewegten Objekten in

Multiprozessor Sydama-2

Eine praxisnahe Bildverarbeitungsanwendung benötigt im Normalfall 10–20 Bildverarbeitungsfunktionen, die entweder in Software (längere Ausführungszeit, geringere Kosten) oder in Hardware (schnelle Lösung, hohe Kosten) realisiert werden können. Der für die Echtzeit-Bildverarbeitung entwickelte heterogene Multiprozessor Sydama-2 erlaubt, ausgehend von der Auswertezeit, durch seine modular erweiterbare Hardware und eine optimale Aufteilung der Funktionen auf Hard- und Software eine kostengünstige Implementierung von Bildverarbeitungsanwendungen. Der flexibel konfigurierbare Videodatenbus mit mehr als zwölf Kanälen und einer totalen Datenrate von 180 bis 900 MByte/s erlaubt, je nach Systemausbau, eine grosse Anzahl von verschiedenartigen Hardwaremodulen miteinander zu verbinden, ohne dass der Datenaustausch zum Engpass wird.

Adresse des Autors:
Edi Hiltebrand, Dipl. El.-Ing. ETH,
EHTZ/IFE, Gloriastrasse 35, 8092 Zürich.

Bildern benötigt wird, mit grosser Geschwindigkeit auszuführen. Allen aufgezählten Signalverarbeitungsalgorithmen ist gemeinsam, dass eine gewichtete Summe mehrerer Quellbildpunkte in einem Zielbild abgelegt wird. Im folgenden werden die verschiedenen, in der Schaltung realisierten Funktionen beschrieben.

Geometrische Transformation

Die geometrische Transformation eines Bildes wird unter anderem zur Korrektur von Abbildungsfehlern des Aufnahmesystems, zur Normierung der Lage und Grösse von Objekten für die Objekterkennung und zur gezielten Verzerrung von Videobildern in Effektmischgeräten von Fernsehstudios eingesetzt. Je nach Anwendung und Anforderungen an die Bildqualität kommt für die Berechnung der Zielpixel-Helligkeit ein Ersetzen durch den Helligkeitswert des am nächsten liegenden Quellpixels (Nearest Neighbour), die bilineare oder die Cubic Spline-Interpolation zum Einsatz. Die Nearest Neighbour-Methode bedingt den kleinsten Rechenaufwand und produziert die grössten Aliasingfehler (Verletzung der Nyquist-Abtastbedingung). Da Bilddaten als zweidimensionale Matrix von orts-, (zeit-,) und amplitudendiskreten Abtastwerten vorliegen, muss zur Vermeidung von Abtastfehlern eine Interpolation ebenfalls in zwei Richtungen erfolgen. Die einfachste Methode ist die bilineare Interpolation zwischen den vier nächstliegenden Pixeln. Will man bessere Resultate erzielen, so rechnet man 16 umliegende Pixel entsprechend dem Abstand zu dem zu berechnenden Pixel mittels Spline-Koeffizienten zusammen. Da sich bei der Cubic Spline-Methode der Aufwand mehr als vervierfacht und die Verbesserung der Bildqualität kaum bemerkbar ist, wird normalerweise mit der bilinearen Interpolation gearbeitet. Wie in [4] gezeigt wird, ist eine Bandbegrenzung der Bilddaten (Tiefpass) zur Vermeidung von Aliasing-Effekten vor allem dann sinnvoll, wenn das Bild verkleinert wird.

Um für jeden Punkt im Zielbild einen Helligkeitswert zu berechnen, wird die Transformationsgleichung zur Umrechnung der Koordinaten vom Quellbild auf das Zielbild meistens rückwärts gerechnet, das heisst man bestimmt für jeden Rasterpunkt im Zielbild die exakten Koordinaten im Quellbild. Damit wird verhindert, dass durch Rundungseffekte Löcher im Zielbild entstehen. Die Transformationsgleichung lässt sich für viele technisch relevante Fälle durch ein Polynom zweiter oder dritter Ordnung in x und in y beschreiben. Damit lassen sich längst nicht alle Transformationen berechnen, aber die wichtigsten wie Translation, Spiegelung, Rotation, Zoom und Scherung sind auch in Kombination mit höheren Korrekturtermen möglich. Um komplexere Transformationen in Videoechtzeit ausführen zu können, werden vorbereitete Adresstabellen verwendet. Mit Hilfe solcher Tabellen lassen sich Roll-, Mehrfachbild- und komplexe Verzerrungseffekte durch Umschalten zwischen mehreren Tabellen realisieren.

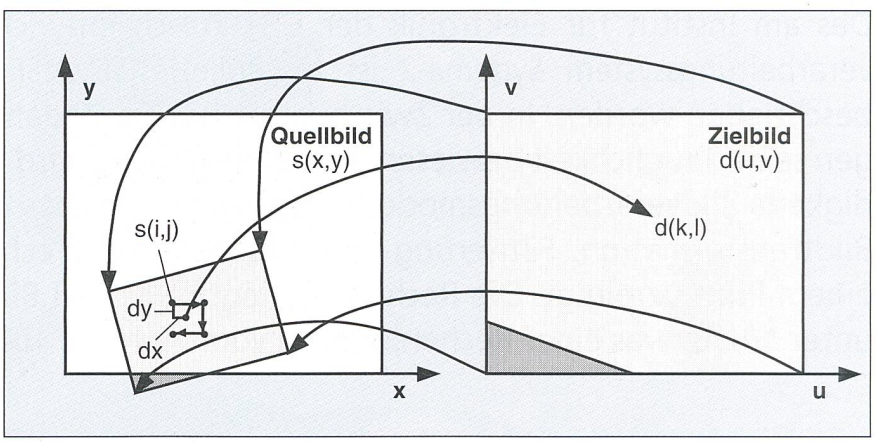

Bild 1 Beispiel einer Bildvergrösserung und -drehung mit bilinearer Interpolation und Clipping

Zur Berechnung einer geometrischen Transformation eines Quellbilds in ein Zielbild mit bilinearer Interpolation der Helligkeitswerte müssen nacheinander folgende Operationen für alle Punkte des Zielbildes ausgeführt werden:

- Berechnen des Polynoms n-ter Ordnung in u und v zur Bestimmung der Koordinaten x und y auf Subpixelgenauigkeit dx, dy im Quellbild $s(i,j)$ (Gleichung 1)
- Test auf Lage innerhalb des Quellbilds (Cropping)
- Auslesen der vier Quellbildpunkte, die um den berechneten Sourcepunkt liegen
- Bestimmung von vier Interpolationskoeffizienten (α, β, χ, δ) aus den Subpixelkoordinaten dx, dy im Ausgangsbild (Gleichung 2)
- Multiplikation der vier Koeffizienten mit den vier Pixelwerten
- Aufsummieren der vier Produkte
- Normierung der Summe auf den Pixelwertebereich
- Abspeichern des Resultats im Zielbild $d(k,l)$
- Adressieren des nächsten Zielpixels und Test auf gültigen Zeilen- und Bildbereich (Clipping)

Da von den aufgelisteten Operationen nur die letzte unabhängig ist, lässt sich die Berechnung kaum parallelisieren. Die Berechnung der Helligkeitswerte der einzelnen Bildpunkte im Zielbild hingegen ist bis auf den Zugriff auf die Sourcepixel unabhängig. Es stehen somit zwei Möglichkeiten zur Beschleunigung der Berechnung offen:

a. die parallele Berechnung mehrerer Werte in getrennten Rechenwerken, die sich aber beim Zugriff auf die Ausgangsbilddaten gegenseitig behindern, oder
b. die Verwendung der Fliessbandtechnik (Pipeline), welche die Berechnungsvorgänge der einzelnen Bildpunkte überlappend auszuführen erlaubt.

Koordinatentransformation:

$$\begin{aligned} x(u,v) = {} & a + b\cdot u + c\cdot u^2 + d\cdot u^3 + e\cdot v \\ & + f\cdot v\cdot u + g\cdot v\cdot u^2 + h\cdot v\cdot u^3 \\ & + i\cdot v^2 + j\cdot v^2\cdot u + k\cdot v^2\cdot u^2 \\ & + l\cdot v^2\cdot u^3 + m\cdot v^3 + n\cdot v^3\cdot u \\ & + o\cdot v^3\cdot u^2 + p\cdot v^3\cdot u^3 \\ y(u,v) \quad & analog \end{aligned} \tag{1}$$

Bilineare Interpolation:

$$\begin{aligned} d_{k,l} = {} & \underbrace{(1-dx)\cdot(1-dy)}_{\alpha}\cdot s_{i,j} + \underbrace{dx\cdot(1-dy)}_{\beta}\cdot s_{i+1,j} \\ & + \underbrace{(1-dx)\cdot dy}_{\chi}\cdot s_{i,j+1} + \underbrace{dx\cdot dy}_{\delta}\cdot s_{i+1,j+1} \end{aligned} \tag{2}$$

Die Vorteile der Variante b sind offensichtlich. Die Verarbeitungseinheiten müssen im Gegensatz zur Variante a nur einmal vorhanden sein und müssen lediglich durch Zwischenspeicher entkoppelt werden. Allerdings ist die Steigerung der Verarbeitungsleistung beim Pipelining auf die algorithmische Parallelität begrenzt, das heisst es können nur so viele Stufen gleichzeitig arbeiten wie es Verarbeitungsschritte im Algorithmus gibt. Zudem wird die maximale Taktgeschwindigkeit durch die langsamste Verarbeitungsstufe bestimmt. Bei der Variante a ist die Steigerung der Verarbeitungsgeschwindigkeit durch die Anzahl der zu berechnenden Bildpunkte begrenzt (geometrische Parallelität), wobei das Verteilen der Quellbildinformation und das

Zusammenfügen der Resultate entsprechend schnell gelöst werden muss. Natürlich lassen sich die beiden Varianten auch kombinieren. Für unsere Zwecke ist die Fliessbandtechnik leistungsfähig genug, und sie findet im Sydama-2 in allen Stufen Verwendung.

Filtrieren

Das Filtrieren eines Bildes ist der geometrischen Transformation mit Interpolation sehr ähnlich. Es wird für jeden Punkt des Zielbilds eine grössere Menge, zum Beispiel 3 x 3, 5 x 5 oder n x n Pixel mit festen Koeffizienten gewichtet und aufsummiert, wobei keine Koordinatentransformation stattfindet. Da die Multiplier-Akkumulator-Schaltung auf eine feste Anzahl von Produkten, die gleichzeitig aufsummiert werden, ausgelegt ist, muss für grössere Kernel die Berechnung zeitlich gestaffelt erfolgen. Bei der hier vorgestellten Realisierung werden die Pixel im Quellbild in einem Spiral Walk abgearbeitet. Ist die Rechnung für einen Zielpixel abgeschlossen, wird im Quellbild in x- und y-Richtung um einen festen Betrag gesprungen und die Summierung der Produkte an diesem Punkt neu gestartet (Bild 3).

Bei der Filtrierung werden die Koeffizienten nicht mehr aus dem Subpixeloffset d_x, d_y der Koordinate berechnet, sondern aus der Position der Quellpixel bezüglich dem Zielpixel. Diese Position kann aus den Steuersignalen des Spiral Walk-Kontrollers bestimmt werden.

Korrelation

Die Korrelation dient zum Suchen von bekannten Mustern in einem Signal. Dazu schiebt man das Muster Schritt für Schritt über das unbekannte Signal, multipliziert die übereinander liegenden Werte miteinander und summiert die Produkte über die Länge des Musters. Um die Korrelationswerte unabhängig von der Signalstärke zu machen, wird die Korrelationssumme durch einen Korrekturterm dividiert, der die Helligkeit des Musters und des untersuchten Bildausschnitts berücksichtigt. Findet man in der Reihe der Korrelationswerte ein scharfes, über einem vorgegebenen Schwellwert liegendes Maximum, so kann man annehmen, dass man das gesuchte Muster gefunden hat. Natürlich gibt es eine ganze Reihe verschiedener Korrelationsmasse mit unterschiedlichen Eigenschaften. In [5] wurde eine experimentelle Studie mit Bildsequenzen und verschiedenartigen Störungen gemacht, um die Charakteristika der gebräuchlichsten Korrelationskriterien quantitativ zu bestimmen.

Die zweidimensionale normierte Kreuzkorrelation berechnet sich nach folgender Formel:

$$K(x,y) = \frac{\sum_v \sum_u s(x+u, y+v) \cdot t(u,v)}{\sqrt{\sum_v \sum_u s^2(x+u, y+v) \cdot \sum_v \sum_u t^2(u,v)}} \qquad (3)$$

Übertragen auf Bilder heisst dies, dass man ein zweidimensionales Muster $t(u,v)$ über einen Suchbereich bewegt, der sich über einen Teil oder das ganze Bild erstreckt. Da Bilder grosse Datenmengen beinhalten, wird versucht, durch geeignete Methoden den Suchbereich einzugrenzen. Dies kann in Bildfolgen durch Bewegungsprädiktion mit Hilfe von einfachen Modellen oder mit einem an die erwartete Bewegung angepassten Kalman-Filter erfolgen. Lediglich in einer Startphase müssen dann Muster im gesamten Bild gesucht werden. Da sich die Grösse oder die Lage des Objekts im Laufe der Bewegung ändert, muss das Suchmuster nachgeführt werden. Ge-

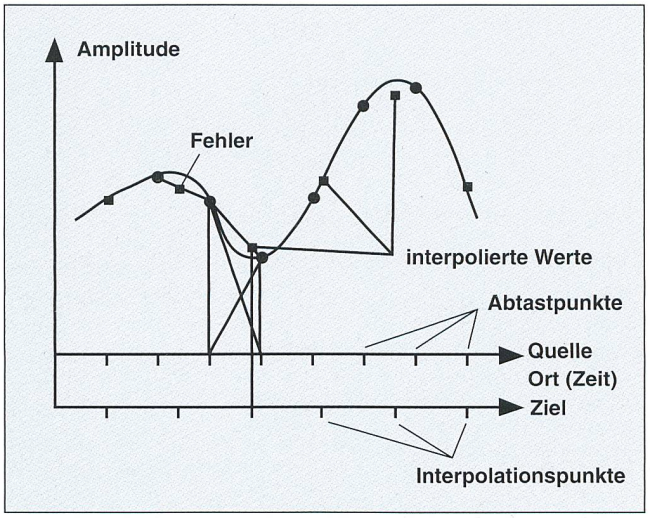

Bild 2 Berechnen von Zwischenwerten mit linearer Interpolation (eindimensionaler Fall)

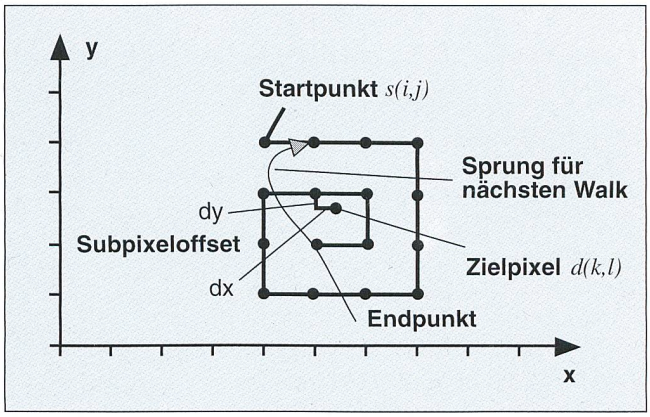

Bild 3 Spiral Walk zur Berechnung der Cubic Spline-Interpolation mit 16 Nachbarpunkten oder Berechnung eines FIR-Filters der Grösse 4 x 4

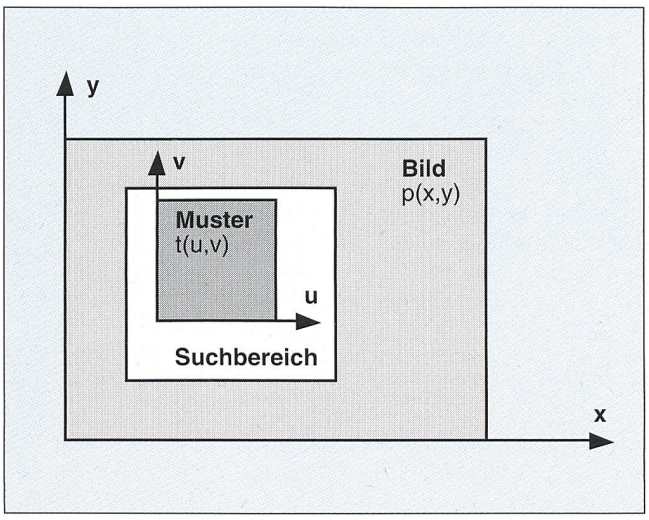

Bild 4 Geometrische Verhältnisse zwischen Bild, Suchbereich und Muster

Glossar

Aliasingfehler: Durch zu langsames Abtasten verursachter Signalfehler. Aliasingfehler treten auf, wenn das Signal Frequenzanteile enthält, die über der halben Abtastfrequenz liegen.

Bilineare Interpolation: Einfaches Interpolationsverfahren zur Berechnung der Signalamplitude zwischen gemessenen Abtastwerten eines bandbegrenzten Signals.

Clockskew: Verschiebung der aktiven Clockflanke durch verschiedene Weglängen, Treibergeschwindigkeit oder Belastung in einer Schaltung.

Cubic Spline Interpolation: Interpolationsverfahren zur Berechnung der Signalamplitude durch Gewichtung der 4 x 4 umliegenden Werte mit Hilfe von Spline-Koeffizienten.

DSP: Digitaler Signalprozessor

EPLD: Erasable Programmable Logic Divice; anwendungspezifisch programmierbarer Logikbaustein.

Kernel: Koeffizientenmatrix für die Berechnung von Filterfunktionen

Kreuz-/Autokorrelation: Mathematische Bestimmung der Ähnlichkeit eines Signals zu einem Mustersignal oder zu sich selbst.

LCA: Logic Cell Array

LUT: Lookup Table

Nearest Neighbour Interpolation: Einfachstes Interpolationsverfahren zur Berechnung der Signalamplitude zwischen den gemessenen Abtastwerten eines bandbegrenzten Signals durch Ersetzen mit dem nächstliegenden Wert.

SMD: Surface Mounted Device. Platzsparende Technologie zur Montage von verpackten Schaltkreisen auf einem Bauteilträger (Printed Circuit Board).

Subpixelkoordinate: Anteil eines Koordinatenwerts, welcher den Abstand zum nächstliegenden Punkt eines abgetasteten Signals darstellt.

Warper: Gerät, das geometrische Transformationen ausführt.

Through Hole-Technik: Durch Kontaktiertechnik; Bauteilanschlüsse werden in durchgehende Bohrungen in Bauteilträger (Print) gelötet.

wünscht ist auch die Möglichkeit, verschiedene Objekte gleichzeitig verfolgen zu können. Durch die Verwendung eines genügend grossen Musterspeichers und einer entsprechenden Auswahllogik können verschiedene Muster in einem Bild nacheinander gesucht werden.

Legt man das Suchmuster in den Koeffizientenspeicher und nimmt man an, dass der Suchbereich rechteckig ist, so lassen sich sämtliche Kreuzkorrelationswerte innerhalb des Suchbereichs mit einer Initialisierung des Warpers generieren. Verwendet man einen zweiten Multiplier-Accumulator und legt an dessen beide Eingänge die Bilddaten an, so lassen sich gleichzeitig die Autokorrelationswerte ($\sum s^2$) berechnen. Die Summe der Quadrate des Suchmusters ($\sum\sum t^2$) in Gleichung 3 kann für ein bestimmtes Suchmuster im voraus gerechnet werden; es muss nicht für jeden Suchpunkt neu ermittelt werden. Zusammen ergeben die beiden Summen den Korrekturterm (Quadrat des Nenners) für die normierte Kreuzkorrelation.

Realisierung

Das Blockschaltbild des realisierten Moduls ist in Bild 5 wiedergegeben. Neben der eigentlichen Verarbeitungshardware enthält die Schaltung noch einen Transputer mit eigenem Speicher, der zur Steuerung des Moduls und zur Kommunikation mit den anderen Karten des Systems eingesetzt wird. Die zentralen Bausteine der Schaltung sind die beiden Image Resampling Sequenzer (IRS) TMC 2302 [6; 7], die den Ablauf der Verarbeitung steuern, die Quell-, Ziel- und Koeffizientenadressen generieren sowie sämtliche Steuersignale für die Multiplier-Akkumulatoren erzeugen. Ein Baustein ist für die x-Richtung, der andere für die y-Richtung zuständig. Durch diese Aufteilung wäre es möglich, mit drei Bausteinen sogar räumliche Transformationen zu rechnen. Abhängig von der Verarbeitungsoperation erbringen die beiden IRS eine äquivalente Rechenleistung von über 600 MIPS.

Die von den beiden IRS erzeugten Quelladressen werden durch den Adressgenerator so übersetzt, dass aus den vier Bänken des Source-RAM gleichzeitig die Werte von vier benachbarten Pixeln ausgelesen werden. Diese Pixelwerte werden im Interpolator mit den vier Koeffizientenwerten, die im Koeffizientenspeicher in Form von gerechneten Tabellen abgelegt sind, multipliziert, und die resultierenden Produkte werden aufsummiert. Am Ausgang des Interpolators stehen 16 Bit des 24 Bit breiten Resultats zur Verfügung. Der Wert wird zum einen über ein spezielles Register an den Signalprozessor (DSP) weitergegeben und zum andern mit Hilfe einer entsprechend gefüllten Lookup Table (LUT), die als Nichtlinearität wirkt, auf 8 Bit begrenzt und in den Zielspeicher geschrieben. Im zweiten Interpolator werden die Pixelwerte quadriert und aufsummiert und das Resultat über ein Register zum DSP weitergegeben. Das Logic Cell Array (LCA), ein programmierbarer Baustein mit einer Komplexität von etwa 5000 Gattern, und der Crossbar Switch erlauben die Anschaltung des Quell- und Zielspeichers an den Videobus des Sydama-2. Über diesen schaltbaren Ringbus mit zwölf Kanälen können Videoströme von den Inputmodulen zu den Verarbeitungseinheiten geführt, Zwischenre-

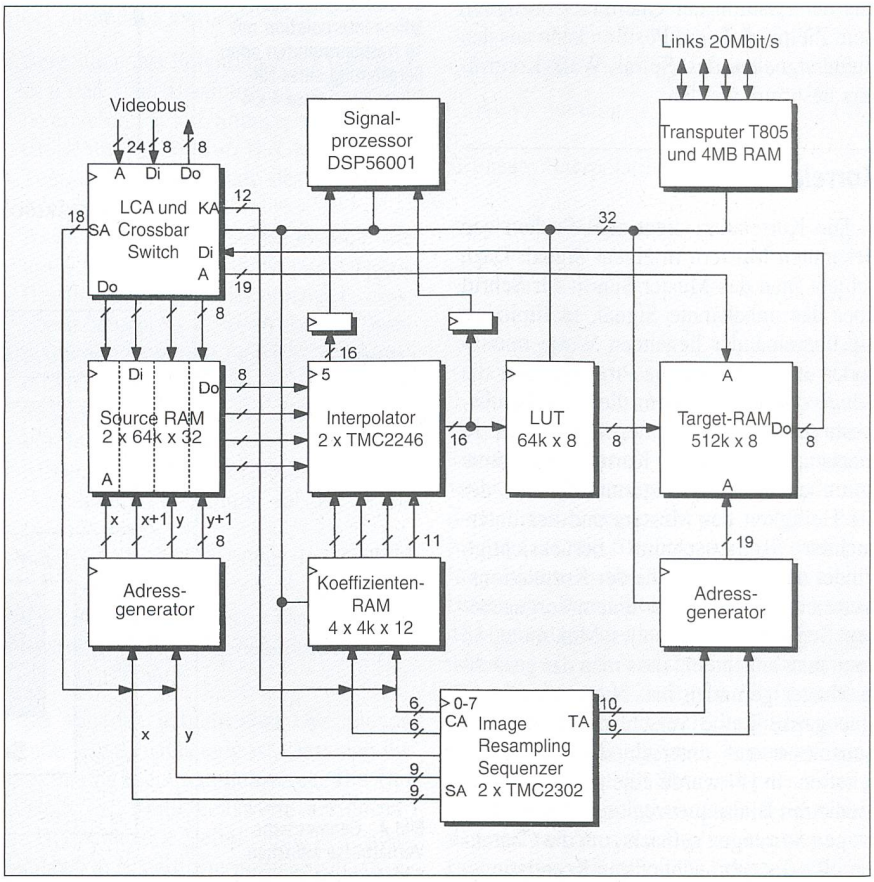

Bild 5 Blockschaltbild des Warpers und Korrelators

sultate weitergeleitet und Resultate zur Ausgabeeinheit verbunden werden. Durch die Verbindung des Crossbar Switchs mit dem Adressbus des Quell- und des Koeffizientenspeichers ist eine flexiblere Adressierung der Bilddaten zur Erzeugung von Bildtransformationen möglich. Der Adressstrom wird dazu von einem LUT-Prozessorelement des Sydama-2 erzeugt und anstelle der vom IRS generierten Adresse an den Quell- und Koeffizientenspeicher gelegt.

Die Bildspeicher wurden mit statischen Speichern der Integrationsdichte 1 MBit mit Zugriffszeiten von 20 ns aufgebaut, die Lookup-Tabellen (LUT) mit 256-KBit-SRAM von 12 bis 15 ns Zugriffszeit. Da die verwendeten Verarbeitungsbausteine relativ hohe Verzögerungen zwischen Takt und Ausgang sowie grosse Setup-Zeiten aufweisen, mussten zur Einhaltung der Zykluszeit von 25 ns noch schnelle Register als Zwischenspeicher verwendet werden. Bei den Koeffizientenspeichern gelangten sogenannte synchrone SRAM zum Einsatz, welche die angelegte Adresse speichern und somit einen externen Zwischenspeicher erübrigen. Für die Steuerlogik wurden bipolare PAL mit 7 ns Durchlaufzeit, und wo es möglich war, 10-ns-GAL verwendet. Für Steueraufgaben, die mit dem Prozessortakt (20 MHz) ablaufen, wurden höher integrierte EPLD eingesetzt.

Damit beim Suchen des Korrelationsmaximums das zeitaufwendige Berechnen der Wurzel im Nenner der Korrelationsfunktion umgangen werden kann, wird der Ausdruck quadriert und das Maximum von $K^2(x,y)$ gesucht. Da keine integrierten Integer-Divisionsbausteine mit einer Wortlänge von mindestens 40 Bit am Markt verfügbar sind, wurde die für die Suche des Maximums der Korrelationsfunktion notwendige Division durch Ausmultiplizieren zweier Brüche und den anschliessenden Vergleich der Produkte realisiert. Da diese Operation nur einmal pro Korrelation an einem Suchpunkt ausgeführt werden muss und somit bei einer typischen Fenstergrösse von 16 x 16 Pixel etwa 1,5 µs dauern kann, wird zur Berechnung ein entsprechend programmierter Signalprozessor (DSP 56002) mit internem RAM eingesetzt. Natürlich muss der Wert des Korrelationsmaximums nach der Suche über das ganze Suchfenster noch durch eine Division und das Berechnen der Quadratwurzel bestimmt werden. Diese Operation darf entsprechend der Grösse des Suchfensters nochmals erheblich länger dauern und kann daher mit der Gleitkommarecheneinheit des als Boardkontroller verwendeten Transputers mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

Die Schaltung ist weitestgehend in verlustleistungsarmer hochintegrierter CMOS-Technik realisiert. Zur Verbesserung der Signalqualität und zur Erhöhung der Packungsdichte wurden vorwiegend SMD-Bauteile eingesetzt. Für die Verteilung des 40-MHz-Takts wurde ein spezieller Clocktreiber mit 8 Ausgängen verwendet, der eine Verteilung des Takts auf dem ganzen Board mit einem Skew (s. Glossar) von weniger als 2 ns erlaubt. Die Lage der Clockleitungen wurde nach dem automatischen Routen überprüft und geringfügig verbessert. Es wurde darauf geachtet, dass der Takt sternförmig verteilt wird, und dass die Leitungen möglichst nur am Ende mit Eingängen belastet sind (Reflexionen). Die Leitungen haben eine Wellenimpedanz von weniger als 50 Ω und können nur dynamisch abgeschlossen werden (RC-Glied).

Die Schaltung konnte auf einem sechslagigen Multilayerprint im Doppeleuropaformat mit durchgehender Masse- und Speisungsebene untergebracht werden. Die Bahnbreiten und die Minimalabstände betragen 0,18 mm (7 mil), was eine recht hohe Dichte von Verbindungen erlaubt. So können zum Beispiel auf einer Ebene zwischen zwei Pins im $^1/_{10}$-Zoll-Raster drei Verbindungen durchgeführt werden.

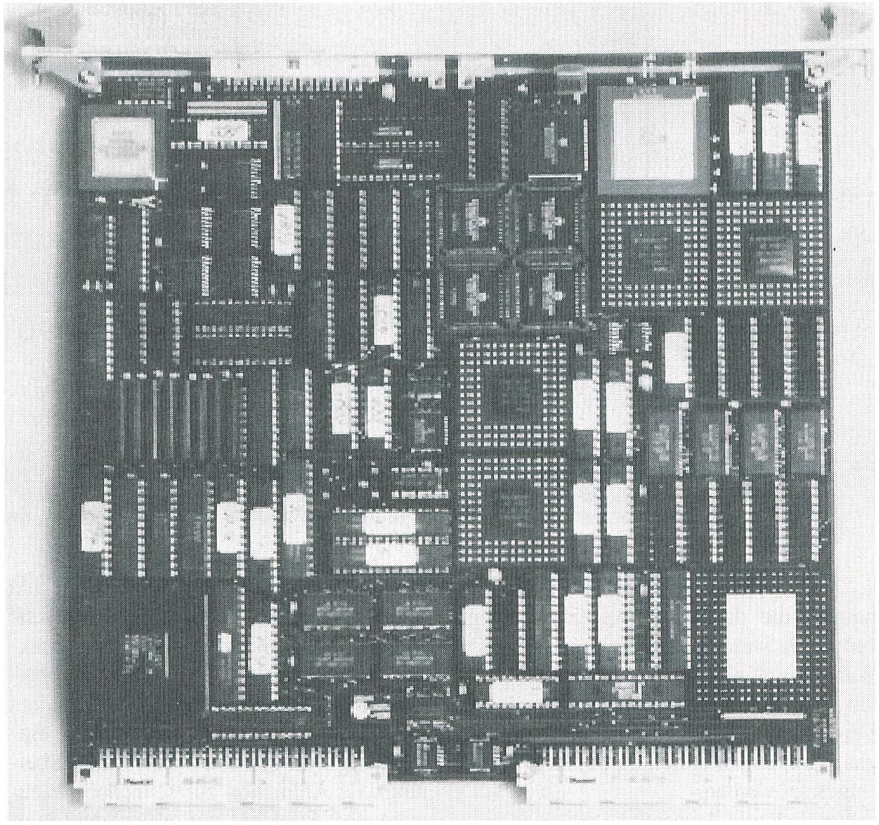

Bild 6 Warper- und Korrelatormodul für Sydama-2

Anwendungen

Dank seinen vielfältigen Hardwaremöglichkeiten ist dieses Verarbeitungsmodul für eine Fülle von Anwendungen in der Bildverarbeitung und Computergraphik geeignet. Ursprünglich wurde die Schaltung für die interaktive Darstellung dreidimensionaler Datensätze mit Hilfe des Prebufferalgorithmus entworfen [8]. Dabei werden die Daten, welche beispielsweise als Messwerte aus der medizinischen Diagnostik mit Magnetresonanz- oder Computertomographie stammen, zuerst in einem zweistufigen Darstellungsverfahren zusammenkopiert, anschliessend wird das Zwischenbild entsprechend der Betrachtungsrichtung zweidimensional gestaucht und geschert. Um ein interaktives Arbeiten zu erreichen, muss die Rechenzeit einer Projektion eines Datensatzes mit 16 Millionen Volumenelementen unter einer Sekunde liegen. Das Zusammenkopieren der einzelnen Schichten kann durch die Verwendung eines Parallelrechners mit acht Prozessorelementen und algorithmusspezifischer Hardware auf etwa 0,7 s gesenkt werden. Das Warpen des Prebuffers ist nicht mehr so leicht zu beschleunigen, da das Verteilen der Daten und das Einsammeln der Resultate einen erheblichen Zeitaufwand darstellt. Durch die zentrale Berechnung der 2D-Verzerrung mit Hilfe des vorgestellten Warpers fallen die Kommunikationszeiten weg und die Transformationsberechnung wird gegenüber der Berechnung mittels eines Prozessors etwa 50mal schneller.

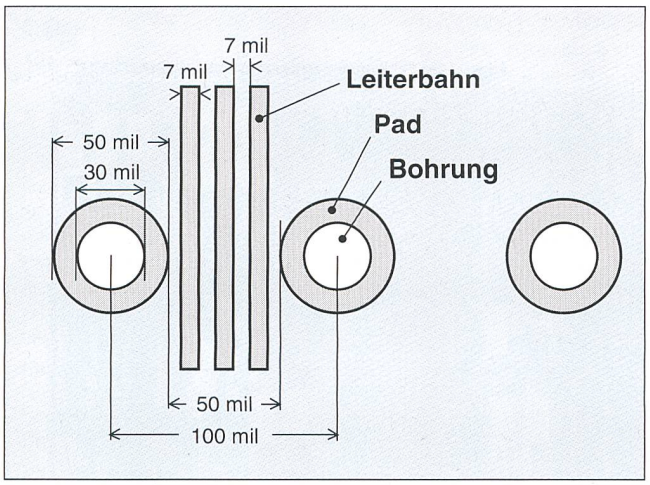

Bild 7 Leiterbahnen zwischen zwei Pins
(1 mil = 1/1000 Zoll = 25,4 µm)

Der gezielte Ausgleich von Bildverzerrungen, die durch das Aufnahmesystem verursacht wurden, lässt sich mit Hilfe des Warpers schnell bewerkstelligen. Das Modul kann auch für die Kompensation von Verdrehungen von Objekten für einen Vergleich mit einem korrekten Objekt effizient eingesetzt werden.

Eine weitere Anwendung ist die Erzeugung von Tiefenbildern in der Robotik durch Bewegen der Kamera und Verfolgen der Spuren vieler Objekte. Dabei ist wichtig, dass eine grosse Zahl von relativ kleinen Mustern in einem Bild in Echtzeit verfolgt, und dass die Muster neuer Objekte, die für das Verfolgen aussichtsreich erscheinen, schnell in den Koeffizientenspeicher übertragen werden können. Die beschriebene Hardware erlaubt das Verfolgen von bis zu 256 Mustern mit 16 x 16 Pixeln, wobei für jedes Muster ein Suchbereich von etwa 20 x 20 Pixeln bei einer Bildrate von 50 Hz abgedeckt werden kann.

Die Verfolgung von bewegten Objekten in einer Szene, wie sie für die automatische Auswertung von Experimenten mit Insekten oder zur Analyse von Strömungsversuchen erforderlich ist, lässt sich mit dem Korrelator ebenfalls rechnen. Weitere Anwendungen in den Bereichen Bildbearbeitung und Animation zur schnellen Erzeugung von Effekten, wie Morphing, Bildüberblendungen und Mapping von Bildern oder Texturen auf Objekte sind denkbar.

Zusammenfassung

Mit der vorgestellten Hardware wurde für das Echtzeitbildverarbeitungssystem Sydama-2 ein Modul entwickelt, das Dank der programmierbaren Komponenten sehr flexibel ist und daher einen weiten Einsatzbereich bei der Vorverarbeitung und Transformation von Videobildern und beim Verfolgen von Objekten hat. Die Herstellungskosten für das Modul belaufen sich auf wenige tausend Franken.

Dank

Diese Arbeit wurde am Institut für Elektronik der ETH durchgeführt. Erste Realisierungsversuche eines Warpers wurden mit grossem Einsatz in der Diplomarbeit von M. Angst und F. Löffel gemacht. U. Wirth hat in seiner Studienarbeit eine Variante des Warpers für den Sydama-2 realisiert und als Assistent das beschriebene Modul entworfen und aufgebaut. Ich möchte allen Beteiligten an diesem Projekt für ihren Einsatz herzlich danken. Mein Dank geht auch an Prof. Dr. W. Guggenbühl für die grosse Freiheit bei der Projektabwicklung und die Organisation der Finanzen.

Literatur

[1] *A. Gunzinger, S. Mathis, W. Guggenbühl:* Synchroner Datenflussrechner zur Echtzeit-Bildverarbeitung, Bulletin SEV/VSE 79(1988)7, S. 362–367.

[2] *A. Gunzinger:* Massgeschneiderte Echtzeit-Bildverarbeitung, Bulletin SEV/VSE 82(1991)21, S. 23–28.

[3] *G. Wolberg, Digital Image Warping:* IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, Calif., 1990.

[4] *P. Stucki:* Image Prozessing for Document Reproduction, In Proceedings of the International Symposium on Advances in Digital Image Processing, Bad Neuenahr, Germany, Plenum Press, New York, 1978.

[5] *P. Aschwanden:* Experimenteller Vergleich von Korrelationskriterien in der Bildanalyse. Diss. ETH 10196, 1993.

[6] *Datenblatt TMC2302:* Image Resampling Sequenzer, TRW 1991.

[7] *J. Eldon* and *R. Wegner:* Using the TMC2301 Image Resampling Sequenzer, Application Note TP-37, TRW 1988.

[8] *E. Hiltebrand:* Interaktive Darstellung und Bearbeitung medizinischer Volumen-Bilddaten, Bulletin SEV/VSE 79(1988)11, S. 614–618.

Module de calcul pour transformation d'images, filtrage et corrélation rapides

Le système modulaire de traitement d'images en temps réel Sydama-2, développé à l'Institut d'électronique de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, a été décrit en détail il y a quelque temps dans le bulletin de l'ASE. Le Sydama-2 a entre-temps prouvé ses capacités dans plusieurs applications. Nous décrivons maintenant dans cet article un nouveau module de traitement d'image à grande vitesse, qui réunit sur un seul circuit imprimé les fonctions de transformation géométrique d'images (warp), le filtrage d'images et le calcul de corrélations. Pour la transformation d'image, on peut calculer des polynômes de transformation du 3e ordre avec une interpolation bilinéaire des données. Le temps de calcul est alors de moins de 10 ms pour une grandeur d'image de 512 x 512 pixels, ce qui correspond à une puissance de calcul de plus de 1000 MIPS. Lors du filtrage d'images, on peut utiliser des noyaux des tailles de 2 x 2 à 16 x 16. La fréquence multiply-accumulate se monte à 160 MHz lors de cette opération. Pour le calcul de la corrélation croisée normalisée, on calcule simultanément les valeurs des corrélations croisées et automatiques, et on détermine aussi le maximum de la corrélation dans la fenêtre de recherche. Le module permet de déterminer en 250 µs un objet d'une grandeur de 16 x 16 pixels à l'intérieur d'une fenêtre de recherche de 25 x 25 pixels. On démontre comment il est possible, par l'emploi d'un matériel spécialisé, d'augmenter considérablement la vitesse de calcul par rapport aux calculateurs universels, pour des algorithmes de complexité moyenne et de grandes séries de données.