

Diss. ETH No. 13546

Optical parallel processing based on the photorefractive effect

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology
Zürich

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Roland Ryf
Dipl. Phys. ETH
born on the 2nd Mai 1968
citizen of Attiswil (BE)

accepted on recommendation of

Prof. Dr. P. Günter, examiner
Prof. Dr. H. Melchior, co-examiner

Zürich 2000

Abstract

In optical parallel processing data pages are modulated on a laser beam and elaborated in a page by page modus. Data pages can contain several millions of bits, thereby providing very high processing rates which have the potential of surpassing conventional electronics.

This thesis is devoted to the investigation and demonstration of high repetition rate optical parallel processing based on new photorefractive materials operated at visible wavelengths. The generation of high frame rate image sequences and the successive optical correlation of these images were investigated in detail. Optical correlation can be used for pattern recognition and object tracking and is therefore of wide interest for practical applications.

Two different kinds of optical correlators have been considered. The foundation for both these correlators is a holographic storage system which, based on pulsed laser read-out, is capable to generate a fast image sequence. With this system a read-out frame rate of 50'000 images/s has been demonstrated. This is to our knowledge the highest sustained frame rate demonstrated for a holographic storage system. Different storage materials namely KNbO_3 , LiNbO_3 , and LiTaO_3 were investigated and successfully used to store 100 images.

The first kind of correlator considered in this work is the Vander Lugt type correlator. It is based on multiple holograms acting as matching filters. These filters were implemented using photorefractive LiNbO_3 and LiTaO_3 crystals. In these materials the photorefractive effect provides a reversible storage of the holograms and a long storage time of several years, or even longer using an appropriate fixing method. These properties make the photorefractive effect one of the best methods for building a Vander Lugt type correlator. With our set-up a correlation rate of 10'000 images/s at a repetition rate of 100 comparing images/s was achieved. In our system a very accurate correlation output was demonstrated, enabling the realization of applications like key search in large databases, quality check systems, pattern and position recognition systems.

The second type of correlator considered in this work is the joint Fourier transform type correlator (JFT). In this arrangement the Fourier transformed of the two modulated input beams, write a hologram in real time in a nonlinear optical material. As nonlinear material we choose photorefractive $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ crystals which was for the first time operated in the interband regime at wavelengths of 488, 518, and 532 nm. Under illumination with 40 ns laser pulses from a Q-switched diode pumped solid state laser at 532 nm, a fast writing time of 2 μs was observed already at a moderate fluence of few $\mu\text{J}/\text{cm}^2$. With this system a correlation rate of 10'000 images/s has been demonstrated. This is the highest correlation rate reported for

a photorefractive JFT correlator at visible wavelength. Unlike for the Vander Lugt type correlator the JFT correlator based on interband gratings maintains the shift invariance between the input pattern. The system can be used for object tracking and pattern recognition in moving scenes.

LiNbO_3 and LiTaO_3 showed a strong self-focusing effect which is in principle undesirable for holographic storage, but can be exploited to produce self-trapped light beams (spatial solitons). The effect was investigated in detail in KNbO_3 leading to first experimental demonstration of spatial solitons in this material.

Zusammenfassung

In der optischen parallelen Datenverarbeitung wird die Information seitenweise auf einem Laserstrahl moduliert und verarbeitet. Die Datenseiten können mehrere Millionen Bits enthalten und ermöglichen somit sehr hohe Verarbeitungsraten, die herkömmliche elektronische Systeme potenziell übertreffen können.

Diese Arbeit ist der Untersuchung und Demonstration optischer paralleler Datenverarbeitung mit hohen Wiederholungsraten in neuen photorefraktiven Materialien bei sichtbarer Wellenlänge gewidmet. Die Erzeugung von Bildsequenzen mit hohen Bildraten und die nachträgliche optische Korrelation dieser Bilder wurde im Detail betrachtet. Die optische Korrelation kann benutzt werden, um Muster zu erkennen, oder um bewegte Objekte zu verfolgen, und ist somit wichtig für viele praktische Anwendungen.

Zwei unterschiedliche optische Korrelatoren wurden in Betracht gezogen. Die Grundlage für beide Korrelatoren bildet ein holographisches Speichersystem, welches durch Beleuchtung mit einem gepulsten Laser eine schnelle Bildsequenz erzeugen kann. Mit diesem System wurde eine Ausleserate von 50'000 Bilder/s erreicht. Dies ist unserer Kenntnis nach die höchste, über mehrere Bilder aufrechterhaltene Bildsequenz, die mittels holographischer Speichersystem erzielt wurde. Verschiedene Materialien, nämlich KNbO_3 , LiNbO_3 und LiTaO_3 , wurden als Speichermedium untersucht und erfolgreich zur Speicherung von 100 Bildern eingesetzt.

Die erste Art optischer Korrelatoren, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, ist der Vander Lugt-artige Korrelator. Er basiert auf mehrfachen Hologrammen, welche als holographischer Beugungsfilter wirken. Die Filter wurden mittels photorefraktiver LiNbO_3 und LiTaO_3 Kristalle realisiert. Die Vielfältigkeit des photorefraktiven Effektes erlaubt eine reversible Speicherung der Hologramme in Kombination mit einer langen Speicherzeit von mehreren Jahren, die durch geeignete Fixierungsmethoden zusätzlich verlängert werden kann. Diese beiden Eigenschaften machen den photorefraktiven Effekt zu einer der besten Methoden zur Realisierung eines Vander Lugt-artigen Korrelators. Mit unserem Aufbau konnten wir eine Korrelationsrate von 10'000 Bilder/s und eine Bildrate von 100 Bilder/s realisieren. Mit unserer Anordnung wurde eine qualitativ hochwertige optische Korrelation demonstriert, was die Realisierung von Anwendungen wie Schlüsselwortsuche in grossen Datenbanken, Qualitätsüberwachungssysteme, Muster- und Positionserkennungssysteme ermöglicht.

Die zweite Art optischer Korrelatoren, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, ist der "joint Fourier transform correlator" (JFT). In dieser Anordnung schreiben die Fouriertransformierten der zwei Eingangsbilder ein Hologramm in Echtzeit in einem optisch nichtlinearen Material. Als nichtlineares Material wur-

den photorefraktive $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ Kristalle gewählt, welche zum ersten Mal mittels direkter Band-zu-Band-Anregung bei einer Wellenlänge von 488, 518 und 532 nm verwendet wurden. Unter Beleuchtung eines gütegeschalteten, diodengepumpten Festkörperlasers mit 40 ns langen Lichtpulsen bei einer Wellenlänge von 532 nm wurde eine schnelle Hologrammaufbauzeit von 2 μs gemessen. Dies wurde schon bei einer geringen Beleuchtung mit einigen $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ beobachtet. Mit unserem System wurde eine Korrelationsrate von 10'000 Bilder/s erreicht. Dies ist die höchste, je erreichte Rate für einen photorefraktiven JFT Korrelator bei sichtbaren Wellenlängen. Im unterschied zum Vander Lugt-artigen Korrelator, ist beim JFT Korrelator der auf band-zu-band-angeregte Gitter basiert bleibt die Translationsinvarianz vollständig erhalten. Das System kann verwendet werden, um bewegte Objekte zu verfolgen, oder zur Mustererkennung in bewegten Bildszenen.

LiNbO_3 und LiTaO_3 wiesen einen starken Selbstfokussierungseffekt auf, welcher grundsätzlich für holographische Speicherung nicht von Vorteil ist, aber in der Erzeugung von selbstgeführten Strahlen (räumliche Solitonen) Verwendung findet. Dieser Effekt wurde ausführlich in KNbO_3 untersucht, was zur ersten experimentellen Beobachtung räumlicher Solitonen in diesem Material geführt hat.