Ein schneller Algorithmus zur Erkennung und Kompensation von Augenbewegungen zur automatischen Durchführung der funduskontrollierten Mikroperimetrie

A. Dölemeyer[1], H. Liebau[1], F. Toonen[2], S. Wolf[2], D. Meyer-Ebrecht[1].

[1]Lehrstuhl für Meßtechnik
[2]Augenklinik der Medizinischen Fakultät
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (R TH), 52056 Aach n
Email: doelemeyer@rwth-aachen.de

Zusammenfassung. Bei der mikroperimetrischen Untersuchung der Funktion des visuellen Systems des Menschen führen unvermeidbare Augenbewegungen zu großen Meßun enauigkeiten. Eine bislang eingesetzte manuelle Nachführung bedeutet eine erhebliche Belastung für den Patienten und den Untersucher. Es wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dem Augenbewegungen in Echtzeit erkannt und ausgeglichen werden können. Dabei wird a-priori-Wissen über das Bildmaterial genutzt, um die Bewegungserkennung stark zu vereinfachen. In einer Kontrollstufe wird die Validität des Ergebnisses überprüft. Die Performance wurde an Hand von Videomitschnitten verschiedener Untersuchungen ermittelt. Bei der Implementierung unter WindowsNT konnte die videofrequente Bestimmung der Augenposition erreicht werden. Es gelang weiterhin, falsch positive Ergebnisse völlig auszuschließen.

Schlüsselwörter Bewegungserkennung, Mikroperimetrie, Echtzeit

1 Einleitung

Wie bei vielen Untersuchungen am Auge stören dessen unwillkürliche und kaum zu beeinflussenden Bewegungen auch die Perimetrie, die „Gesichtsfeldmessung“. Diese Untersuchung ist ein psychophysisches Meßverfahren zur Bestimmung der Lichtunterschiedsempfindlichkeit der menschlichen Retina. Sie dient der funktionalen Analyse der Wahrnehmung durch das visuelle System von den Rezeptoren bis zum Visuellen Kortex. Das Verfahren liefert wichtige Erkenntnisse über die Netzhautphysiologie und unterstützt die Diagnostik unterschiedlicher Augenerkrankungen [1]. Darüber hinaus können die Auswirkungen pathologischer Veränderungen der Durchblutung oder der Morphologie der Netzhaut auf die Funktion der Wahrnehmung untersucht werden.

Im Unterschied zur normalen (Ku el-)Perimetrie [2] bedient sich die Mikroperimetrie des Scanning-Laser-Ophthalmoskops (LO, Rodenstock Inst.), mit dem ein Videobild des Augenhintergrunds erzeugt wird [3]. Dies erlaubt die permanente Kontrolle auf Fundusbewegungen. Gleichzeitig können über e nen akusto-optischen Modulator synchron zum Bildsignal beliebige Videobilder auf die Retina projiziert werden. Das wird ausgenutzt, um dem Patienten Lichtpunkte in einem vom Untersucher festgelegten Raster zu präsentieren (s. Abb 1), deren W hrnehmung mit Hilfe

eines Drucktasters bestätigt werden muß. An den Rasterpunkten werden die Intensitäten solange variiert, bis die Wahrnehmungsschwelle festgestellt ist.

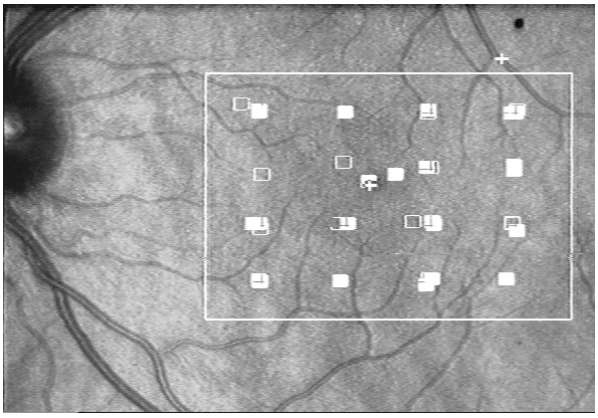

Abb.1 Fundusbild mit Fixationskreuz, Stimulusraster und Referenzpunkt.

Augenbewegungen bilden hierbei ein grundlegendes Problem. Sie führen einerseits zu einer Verwischung des individuellen Stimulus, der eine Präsentationszeit von etwa 200 ms (5 Videobilder) hat Andererseits kann das Stimulusraster nicht mehr eingehalten werden, wenn zwischen Stimuli mit unterschiedlichen Intensitäten an derselben Position eine Bewegung auftritt. Diese Fehler können es im schlimmsten Fall notwendig machen, eine Untersuchung vollständig zu wiederholen.

Bisher eingesetzte experimentelle Perimetrie-Software [4] erlaubt die Berücksichtigung von Augenbewegungen nur über eine manuelle Markierung eines Referenzpunktes nach oder direkt vor der Präsentation des Stimulus. Dieses Vorgehen verlangt vom Untersucher während der gesamten Untersuchungszeit ein hohes Maß an Aufmerksamkeit und gestaltet die Untersuchung schwierig und aufwendig. Eine automatische Durchführung ist somit bisher nicht möglich.

Ansätze für die automatische Erkennung von Augenbewegungen sind in der Ophthalmologie bereits bei der Unterstützung der Laserkoagulation verfolgt worden [7,8]. Die dabei erzielten Positionsbestimmungsraten von etwa 5 Positionen/sec reichen jedoch bei der hier betrachteten Problematik nicht aus.

Der hier vorgestellt Lösungsansatz macht sich den typischen Inhalt von Fundusbildern zunutze, um die Bestimmung der Verschiebung stark zu vereinfachen. Aufgrund der besonderen Lage und des Verlaufs der Blutgefäße in de Fundusbildern kann der Verschiebungsvektor aufeinanderfolgender Bilder in zwei orthogonale Komponenten separiert werden, deren sukzessive Bestimmung schnell und einfach durchführbar is . Die Korrektheit der so bestimmten Position wird erst in einem nachfolgenden Kontrollschritt sichergestellt. Dabei werden auch Bildstörungen durch Lidschlag oder starke Verzerrungen automatisch erkannt.

Der Algorithmus wurde in ein neu entwickeltes Mikroperimetrie-Untersuchungsprogramm [5] integriert [6]. Eine sehr wichtige Anforderung war dabei eine schritthaltende Verarbeitung, also die Positionsbestimmung mit Videofrequenz.

Die Funktion des Gesamtsystems wurde an Hand von Videoaufzeichnungen von Untersuchungen überprü t und bewertet.

2 Bewegungserkennung, Suchalgorithmus

Der Lösungsansa z basiert auf dem Template-Matching-Verfahren, mit dem die Verschiebung in aufeinanderfolgenden Bildern aus dem Bewegungsvektor von Bilddetails bestimmt wird, die so lange verschoben werden, bis eine Übereinstimmung gefunden wird. Um den Zeitanforderungen bei der Perimetrie (25 ositionsbestimmungen/sec) genüge zu können, muß der Suchbereich stark verkleinert werden, ohne dabei jedoch den Bereich detektierbarer Verschiebungen einzuschränken. Dazu ist eine Reihe von Vereinfachungen notwendig.

Aufgrund der typischen Augenbewegungen, die durch Einblenden einer Fixationshilfe (Fixationskreuz) beeinflußt sind, können die zu erkennenden Verschiebungen eingeschränkt werden:

- Rotationen des Auges um die optische oder Visuelle Achse sind selten und klein gegen Verschiebungen. Sie werden vernachlässigt.
- Verzerrungen des Bildes durch große Sakkaden brauchen nur erkannt zu werden. Es muß keine Korrektur vorgenommen werden.
- Kopfbewegungen werden durch eine Kinn- und Stirnstütze am Aufnahmegerät SLO weitgehend unterdrückt und resultierende Maßstabsänderun en o.ä. daher ebenfalls vernachlässigt.

Die typische Fundusmorphologie kann dazu ausgenutzt werden, den Suchbereich einzuschränken. Bei der Mikroperimetrie wird in der Regel in der Nähe der Makula untersucht. Die Papille ist meist (zumindest te lweise) sichtba . Vom Sehnerv aus verlaufen die großen Gefäße in ie vier retinalen Quadranten. In der Regel lassen sich so Gefäßabschnitte finden, die annähernd senkrecht zueinander verlaufen und stückweise gerade sind. Unter diesen Bedingungen kann die Bestimmung der Verschiebung in einer stufenweise Bestimmung von zueinander senkrechten Verschiebungskomponenten entlang von Linien aufgeteilt werden (Abb 2.). Die Ge äßkanten lassen sich dabei wegen ihres guten Kontrastes mit dem Template-Matching unter Benutzung des Kreuzkorrelationskoeffizienten als Übereinstimmungsmaß sehr sicher und weitgehend unabhängig von Beleuchtungsschwankungen entlang der Suchlinien wiederfinden. Gegenüber einem Template-Matching mit einem 2D-Bildbereich ist so der Suchbereich stark verkleinert.

Die Suche läuft in 3 Stufen ab s. Abb 2). Zu Begi n der Untersuchung werden zwei Punkte auf Gefäßkanten man ell ausgewählt. Die Richtungen der Kanten werden automatisch bestimmt und die initialen Suchrichtungen der ersten Stufe senkrecht dazu festgelegt. Entlang dieser beiden Suchrichtungen wird nun die neue Position der Kanten gesucht. Die Verschiebung der Kante, die das bessere Qualitätsmaß liefert wird als die erste Komponente der Verschiebung übernommen. Sämtliche Anfangspositionen werden nun entsprechend nachgeführt. In der zweiten Stufe wird die zweite Komponente der Verschiebung analog zur ersten senkrecht zu dieser bestimmt. In der dritten Stufe werden die Kandidatenpositionen mit einer relativ kleinen 2D-Referenzmaske in einem sehr kleinen Suchbereich überprüft un die „richtige“

Position ausgew hlt. In diesem Schritt werden Ungenauigkeiten bei der resultierenden Verschiebung durch kleine Fehler bei der Bestimmung der einzelnen Komponenten ausgeglichen.

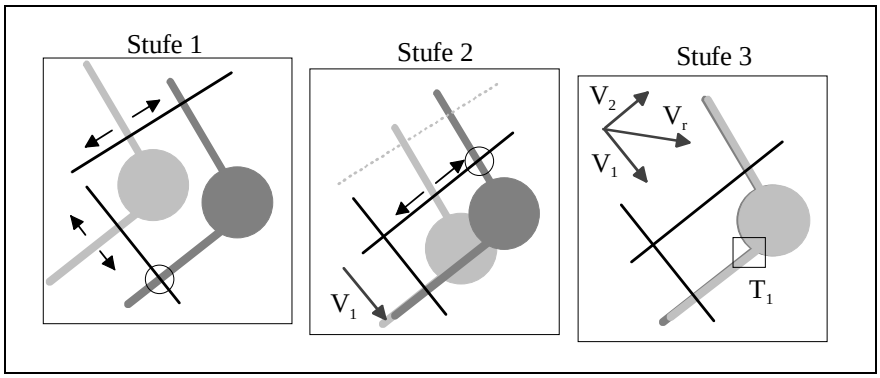

Abb. 2: Die 3-stufige Suche zur Bestimmung der resultierenden Verschiebung V_r aus den orthogonalen Komponenten V_1 und V_2. Das Template T_1 dient zur Validierung der ermittelten Verschiebung. Zu beachten ist, daß in Stufe 1 die Richtungen nur näherungsweise orthogonal sein müssen.

Das Qualitätsma bei der Bestimmung der Gefäßkanten-Pos tion wird auch für die Erkennung von Bildstörungen durch Lidschlag herangezogen. Bildverzerrungen durch schnelle Sakkaden können an Hand der Lage der Matchpunkte auf den Gefäßkanten zueinander identifiziert werden.

3 Ergebnisse

Verschiebungen bis zu 20% der horizontalen Bilddimension (CCIR-Auflösung 768 Bildpunkte) - entsprechend etwa 6 Grad Raumwinkel - können sicher erkannt werden. Die Rechenzeit beträgt dafür au einem 200MHz Pentium im Mittel 18,5 ms, maximal 20 ms. Damit steht bei der Bildrate von 25 Bildern/sec noch genug Zeit für Betriebssystem-Aufgaben und Steuerprogrammfunktionen zur Verfügung.

Die Performance des Algorithmus und seiner Implementierung wurden an realen und an künstlic erzeugten Bildsequenzen überpr ft. Dabei wurde der Einfluß der Parameter des Algorithmus und die Rauschempfindlichkeit untersucht. Folgende vier Ergebnisfälle wurden unterschieden:

- falsch negativ: richtige Position fälschlicherweise abgelehnt. Fehler!
- richtig negativ: falsche Position zu recht als solche erkannt und abgelehnt.
- falsch positiv: falsche Position als richtige erkannt. Gravierender Fehler!
- richtig positiv: richtige Position erfolgreich bestimmt.

Bildausfälle durch Lidschlag und schnelle Augenbewegungen, die zu Bildverzerrungen führen, werden mit hoher Zuverlässigkeit automatisch erkannt und die Ergebnisse entsprechend verworfen. Die Prüfung eines solchen Rasterpunktes wird dann mit der entsprechenden Intensität wiederholt. Die Ergebnisse bei realen Bildsequenzen zeigen ein gutmütiges Verhalten der Parameter „Maskengröße“ (Linie länge) und der

„Vertrauensschw lle“ (Bewertung des Matching-Qualitätsmaßes und der Validierungsstufe). Bei den durchgeführten Experimenten konnten auch unter schlechten Bedingungen – L dschlag und sich aus dem Bildbereich bewegende Kanten – die Parameter immer so gewählt werden, daß falsch positive Ergebnisse auszuschließen waren. Die so gefundenen Parameter funktionieren auch im Normalfall, so daß eine individuelle Anpassung nicht notwendig ist. Falsch negative Ergebnisse verschlechtern die Ausbeute der Stimuli, haben aber keine Auswirkung auf die erzielte Genauigkeit.

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein mehrstufiger schneller Suchalgorithmus zur Erkennung von Augenbewegungen für den Einsatz bei der Mikroperimetrie mit dem SLO entwickelt. Bei der Implementierung unter WindowsNT konnte eine schritthaltende Verarbeitung erreicht werden.

Mit dem vorgestellten System kann durch die Einhaltung des Stimulusrasters nunmehr die hohe Ortsauflösung des SLO bei der Untersuchung auch kleiner morphologischer Veränderungen genutzt werden. Die Untersuchung vereinfacht sich für den Mediziner deutlich, da eine manuelle Nachführung entfällt. Die notwendige Zeit für eine Untersuchung wird deutlich reduziert. Die Anforderungen an die Konzentrationsfähigkeit der Patienten sind damit herabgesetzt, so daß mit glaubwürdigeren Ergebnissen zu rechnen ist.

Mit dem System ist die Grundlage dafür gelegt, die Mikroperimetrie vollständig zu automatisieren und die Durchführung durch geschultes Hilfspersonal zu ermöglichen.

5 Referenzen

1. Reim M: Augenheilkunde, Enke, Stuttgart, 1993
2. Dannheim F: Computer-Perimeter. Ophthalmologisch-optische Instrumente, Rassow B (Hg.). Enke, Stuttgart, 1987
3. van de Felde FJ, Jalkh AE, Elsner AE: Microperimetry with the scanning laser ophthalmoskop. Perimetry Update, Proc Ixth Intenational Perimetric Society Meeting. Kugler Pub, pp. 93-101, 1990
4. Rohrschneider K, Becker M, Fendrich T, Völcker HE: Kinetische funduskontrollierte Perimetrie mit dem Scanning-Laser-Ophthalmoskop. Klinische Monatsblätter für Augenheilkunde, 2 (207):102-110. Okt 1995
5. Buchholtz E: Konzeption und Aufbau einer Steuereinheit zur durchführung der Mikroperimetrie mit dem Scanning-Laser-Ophthalmoskop. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Meßtechnik, RWTH Aachen, 1996
6. Liebau H: Integration eines Verfahrens zur automatischen Verfolgung von Augenbewegungen in eine Steuereinheit für die Mikroperimetrie, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Meßtechnik, RWTH Aachen, 1997
7. Markow MS, Rylander HG, Welch AJ: Real-Time Algorithm for Retinal Tracking. IEEE Trans. Biomed. Eng. 40 12), 1993
8. Barrett SF, Jerath MR, Rylander HG, Welch AJ: Digital tracking and control of retinal images. Optical Engineering 33( ), 150-159, 199