

Ultradünnes Bilderfassungssystem basierend auf künstlichen Facettenaugen

Jacques Duparré, Peter Dannberg, Peter Schreiber, Andreas Bräuer



Jacques Duparré



Peter Dannberg



Peter Schreiber



Andreas Bräuer

Einleitung

Natürliche Facettenaugen vom Appositionstyp vereinigen ein sehr kleines Augenvolumen mit einem großen Gesichtsfeld, allerdings bei vergleichbar geringem Auflösungsvermögen. Ein Insektenauge besteht aus einer Anordnung von Hunderten bis Zehntausenden sehr kleiner Linsen, jede mit einer kleinen Gruppe zugehöriger Fotorezeptoren, angeordnet auf einer gekrümmten Oberfläche. Jede Mikrolinse fokussiert nur Licht auf seine zugehörigen Rezeptoren, welches aus einer bestimmten Richtung des Objektes kommt. Damit erzeugt jeder optische Kanal nur einen Bildpunkt. Die Gesamtheit der Signale aller Kanäle liefert dann das komplette Bild. Für kleine wirbellose Tiere ist dies die bestmöglich angepasste Lösung, um genügend bildliche Information über ihre Umgebung zu sammeln, ohne dabei das Insektengehirn mit aufwendiger Bildverarbeitung zu überlasten. Trotzdem wurde dieses Prinzip bis heute nicht effizient in die technische Optik überführt. Die Motivation für das hier präsentierte künstliche Facettenauge ist es, Bilderfassungssysteme mit minimaler Baulänge zu entwickeln. Künstliche Facettenaugenkameras sollen z. B. in intelligente Chipkarten, Folien oder Bildschirme integrierbar sein und gleichzeitig nicht als Kamera identifiziert werden können.

Das Konzept künstlicher Facettenaugen

Künstliche Rezeptorarrays wie z. B. CCD- oder CMOS-Sensoren werden heutzutage in planarer Halbleitertechnologie gefertigt. Deswegen muss ein dünnes, monolithisches, auf künstlichen Facettenaugen basierendes Objektiv ebenfalls eine ebene Struktur haben.

Das Objektiv, wie in Abb. 1 a, b gezeigt, besteht aus einem Array von Mikrolinsen mit Durchmesser D , Brennweite f und Abstand p_L auf der Vorderseite einer dünnen Abstand haltenden Struktur und einem Array von Lochblenden mit Durchmesser d und Abstand p_p in der Brennebene der Mikrolinsen auf der Rückseite /1/, /2/. Die optischen Achsen und damit die Blickrichtungen der optischen Kanäle wandern durch die Abstandsdifferenz $p_L - p_p$ von Mikrolinsen und Lochblenden von Kanal zu Kanal, woraus der Abtastwinkel $\Delta\Phi$ resultiert. Der Akzeptanzwinkel $\Delta\varphi$ eines Kanals ist bestimmt durch die Größe des Lochblendendurchmessers und Beugungseffekte an den Öffnungen der Mikrolinsen. Der Akzeptanzwinkel $\Delta\varphi$ ist damit ein Maß, welcher Raumwinkel des Objektes vom optischen System als ein Bildpunkt wiedergegeben wird. Wie auch in ihrem natürlichen Äquivalent ist es notwendig, die Kanäle künstlicher Facettenaugen untereinander durch absorbierende Trennwände optisch zu isolieren, um ein Übersprechen und daraus resultierende Geisterbilder zu verhindern.

Realisierung durch Mikrooptik-Technologie

Das künstliche Facettenaugenobjektiv wird mittels lithographischer Prozesse im Wafermaßstab hergestellt. Für einen ersten technologischen Ansatz wurde ein dünner 4 Zoll-Glas-Wafer mit runden Mikrolinsen in quadratischer Anordnung auf der Vorderseite und Lochblenden auf der Rückseite strukturiert (Abb. 2 a). Die Dicke des Wafers ist dabei genau an die Brennweite der Mikrolinsen in Glas angepasst. Die Lochblenden werden mittels Photolithografie und Nass-Ätzen einer 200 nm dicken Metallschicht auf dem Glas-Wafer aufgebracht.

Ultra-thin vision system based on artificial compound eyes

Jacques Duparré, Peter Dannberg, Peter Schreiber, Andreas Bräuer

Introduction

Apposition compound eyes combine small eye volumes with a large field of view at the cost of low spatial resolution. A natural compound eye is composed of hundreds to tens of thousands of microlens-receptor units arranged on a curved surface. Every lenslet focuses light only from a small solid angle of object space onto its associated photoreceptors. Each channel is generating one image point. The combination of all channels' signals results in the overall image. For small invertebrates the compound eyes are the perfectly adapted solution to get sufficient visual information about their environment without overloading their brain with the necessary image processing. However, to date little effort has been made to technically adopt this principle in the field of optics. The development of the technical compound eye presented here was motivated by the requirement to develop an imaging system with a minimum thickness. Compound eye cameras would fit into credit cards, sheets or displays and would not be recognized as cameras.

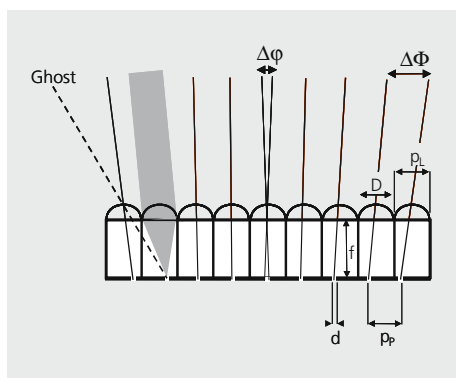


Abb. 1a: Prinzip eines künstlichen Facettenauges vom Appositionstyp in planarer Bauweise.

Fig. 1a: Principle of a planar artificial apposition compound eye.

Concept of artificial compound eye optical sensors

Artificial receptor arrays such as CCD- or CMOS-sensors are fabricated on planar surfaces. Thus, a thin monolithic objective based on the artificial apposition compound eye concept has to be a planar structure. The objective, as shown in Fig. 1 a and b, is simply composed of an array of micro lenses with diameter D , focal length f and pitch p_L on the front side of a spacing structure and a pinhole array with pinhole diameters d and pitch p_P in the lenslets focal plane on the reverse side [1, /2]. The optical axes and thus the optical channels' directions of view are directed outwards due to a pitch difference $p_L - p_P$ of microlens- and pinhole arrays which results in the sampling angle $\Delta\Phi$. The acceptance angle $\Delta\phi$ of a channel is determined by the pinhole-diameter d and diffraction effects of the lenslet apertures. $\Delta\phi$ is a measure of which solid angle

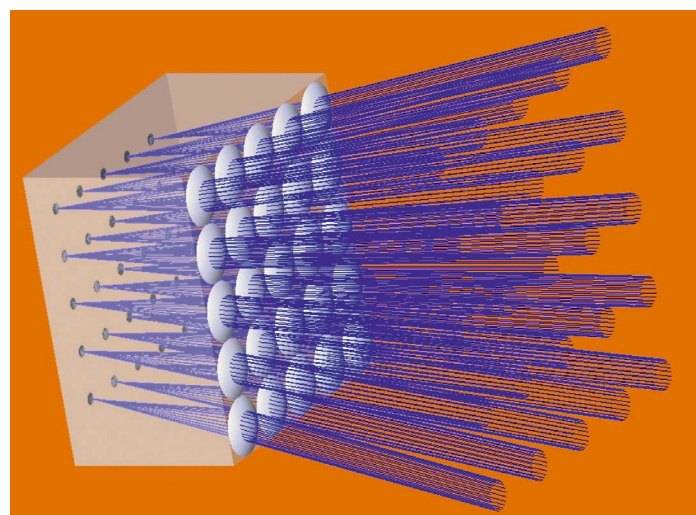


Abb. 1b: 3-D-Modell des künstlichen Facettenauges.

Fig. 1b: 3D-model of the artificial compound eye objective.

in object space is represented by the optical system as one image point. As with the natural equivalent, opaque walls are necessary between ommatidia in order to prevent cross-talk of adjacent channels and the resulting ghost images.

Fabrication by micro-optics technology

The generation of the artificial apposition compound eye objective is carried out using lithographical processes on a wafer scale. The first technical approach used patterning of a thin 4-inch glass wafer with arrays of circular lenslets in a rectangular arrangement on one side and pinhole arrays in the focal plane on the opposite side (Fig. 2 a). The pinhole arrays were generated by photolithography and wet etching of a 200 nm thick metal film. The generation of the microlens arrays consisted of several steps involving master and mold generation followed by UV-replication.

Die Mikrolinsen werden in mehreren Schritten gefertigt:

Master-Herstellung durch Aufschmelzen von Photolackpodesten auf einem separaten Silizium-Wafer, Erzeugen des inversen Werkzeuges und nachfolgende UV-Abformung mit einem modifizierten Mask-Aligner. Hierbei wird die Lücke zwischen Glas-Wafer und Abformwerkzeug mit UV-härtbarem, anorganisch-organischem Polymer gefüllt, mit UV-Licht ausgehärtet und dann das Werkzeug entfernt. Auf eine ähnliche Art und unter zusätzlicher Nutzung von mit hohem Aspektverhältnis strukturierbarem Photopolymer als Abstandstruktur zwischen Mikrolinsen und Lochblenden wurde in einem zweiten Technologieschritt ein künstliches Facettenauge mit integrierten Trennwänden zwischen den Kanälen realisiert (Abb. 2 b), um den Effekt auf die Unterdrückung des Übersprechens zu untersuchen.

Ein künstliches Facettenaugenobjektiv des ersten technologischen Ansatzes (dünnes Glas-Substrat) wurde direkt auf ein opto-elektronisches Empfängerarray mit 128 x 128 Pixeln und 69 µm Pixelabstand, welches eine analoge, pixelnahe Berechnung von Kontrast und Kantenorientierung direkt auf dem Bildsensor beinhaltet, aufgebracht /3/. Das resultierende, nur 206 µm dünne Objektiv hat eine Blendenzahl von 2.2, ein Gesichtsfeld von 20° x 20° und eine Vergrößerung, die bei einem klassischen Objektiv 24 mm Brennweite entspricht /4/. Es wurden verschiedene Objektive mit Lochblendendurchmessern von 2 bis 8 µm im Wafermaßstab hergestellt, um den Einfluss auf Auflösungsvermögen und Lichtstärke zu untersuchen (Abb. 3 a). Diese Objektive wurden vereinzelt und auf das Empfängerarray so aufgebracht, dass sich die Lochblenden stets zentriert vor den korrespondierenden Empfängerpixeln befinden (Abb. 3 b, c).

Charakterisierung hinsichtlich Auflösung, Lichtstärke und Falschlicht

Mit dem beschriebenen Bilderfassungssystem wurden verschiedene Testmuster aufgenommen und hinsichtlich Auflösungsvermögen und Lichtstärke der Anordnung untersucht.

Da in dem ersten technologischen Ansatz auf Trennwände zwischen den Kanälen verzichtet wurde, muss die Größe der Testobjekte dem Gesichtsfeld der Optik angepasst sein, um ein Übersprechen benachbarter Kanäle zu vermeiden. Abbildungen 4 a und b zeigen den selben Siemensstern, einmal abgebildet durch das beschriebene künstliche Facettenaugenobjektiv und zum anderen abgebildet durch ein klassisches Objektiv mit 1/3 "Bildformat, Blendenzahl 2.0 und Brennweite 12 mm. Abbildung 4b verdeutlicht die Limitation der Auflösung durch die Nyquistfrequenz des verwendeten Empfängerarrays. Die Auflösung in Abb. 4 a ist ungefähr halb so groß. Die Begrenzung der Auflösung des künstlichen Facettenaugenobjektives resultiert aus der leichten Überlappung der Akzeptanzwinkel benachbarter optischer Kanäle.

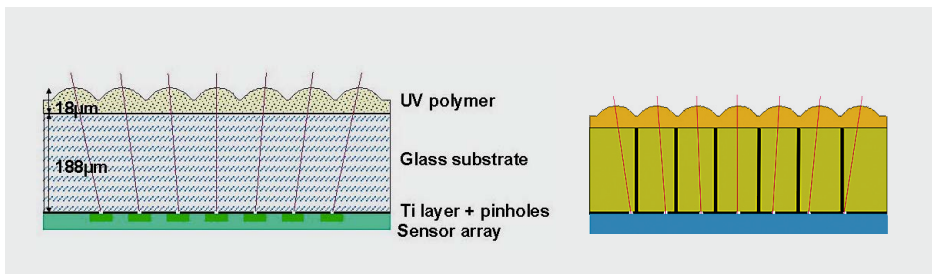


Abb. 2 a:
Schematische Seitenansicht der realisierten Kamera. Glassubstrat mit repliziertem Linsenarray auf der Vorderseite und Lochblendenarray und Detektorarray in der Bildebene der Mikrolinsen auf der Rückseite.

Fig. 2 a:
Schematic side view of the fabricated camera. Replicated lens array, glass substrate, pinhole array and detector array in focal plane.

Abb. 2 b:
Objektiv mit absorbierenden Wänden zwischen den Kanälen zur Verhinderung des Übersprechens.

Fig. 2 b:
Objective with opaque walls between channels for prevention of cross talk.

The photoresist master pattern is fabricated on a silicon wafer in a standard procedure (photolithography in combination with a heating/reflow process). An inverse mold is then generated from the master structure. The replication itself is carried out in a modified contact mask aligner where the gap between glass wafer and mask/mold is filled by a UV curing inorganic-organic hybrid polymer, which is subsequently cured and separated from the mold. In order to overcome the crosstalk problem we equipped the artificial apposition compound eye with opaque walls, using high-aspect-ratio photolithography (Fig. 2 b).

A compound eye objective made by the first technical approach (glass substrate) was directly attached to an opto-electronic sensor array with 128 x 128 pixels and 69 µm pixel-pitch capable of on-chip analog computation

of contrast magnitude and direction of image features /3/. The 206 µm thin imaging system has an F-number of 2.2, a field of view of 20° x 20° and a magnification of an equivalent focal length of 24 mm /4/. Cameras with different pinhole sizes covering the photo-sensitive area of the sensor pixels ranging from 2 to 8 µm were realized in order to examine the influence on resolution and sensitivity (Fig. 3 a). The wafer-scale fabricated objectives are subsequently diced and aligned in front of the detector array (Fig. 3 b, c).

Characterization

Different test patterns were captured using the compound eye vision system and investigated with respect to resolution and sensitivity. Due to the lack of opaque walls between the channels in the first technological

approach, the size of the object presented to the optical system must be matched to its FOV to avoid crosstalk of adjacent channels. Figures 4 a and b show the same radial star pattern imaged by the artificial apposition compound eye and imaged using a bulk 1/3" image format objective with F/# 2.0 and a focal length of 12 mm, respectively. Fig. 4 b shows the limitation of resolution by the sensor's Nyquist frequency. The image resolution in Fig. 4 a using the artificial compound eye objective is approximately half that of the resolution shown in Fig. 4 b. The limiting factor of resolution of the compound eye objective is the overlapping of acceptance angles of the individual channels.

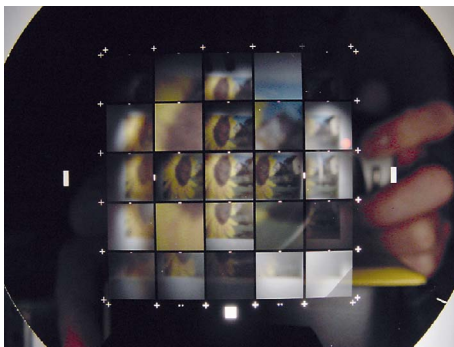


Abb. 3 a:
Wafer mit 5 x 5 ultra-flachen Objektiven vor der Vereinzelung, welche das Bild einer Sonnenblume abbilden.

Fig. 3 a:
Wafer with 5 x 5 ultra-thin objectives (before dicing) imaging a picture of sunflower.

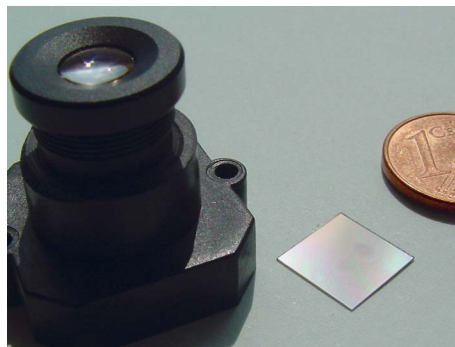


Abb. 3 b:
Vereinzelt künstliches Facettenaugenobjektiv im Vergleich zu einem 1 Euro-Cent-Stück und klassischem Objektiv, welches sonst zur Erzeugung des Bildes auf dem verwendeten Sensor genutzt wird.

Fig. 3 b:
Diced artificial compound eye-objective in comparison to a 1 Euro-Cent and the type of bulk objective usually used with the applied sensor.

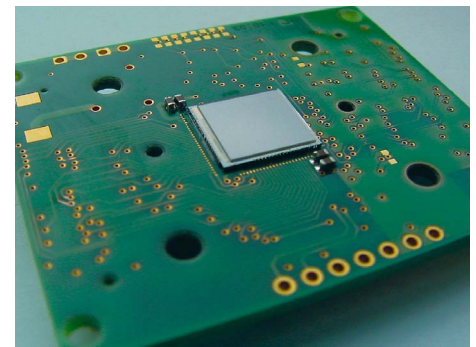


Abb. 3 c:
Künstliches Facettenaugenobjektiv, angebracht auf dem CMOS-Sensor (freundliche Leihgabe des Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Schweiz).

Fig. 3 c:
Objective attached to CMOS-sensor (courtesy of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Switzerland).

Abbildung 4 c zeigt die Aufnahme eines Portraits von Carl Zeiss, welche deutlich macht, dass mit dem beschriebenen ultradünnen Bilderfassungssystem sogar Gesichter erkennbar aufgenommen werden können. Dies verspricht für viele Anwendungen, wie z. B. Sicherheitsüberwachung, automobile Sensoren und Identifikation, von höchstem Interesse zu sein. Für eine quantitative MTF-Bestimmung wurden Strichgitter verschiedener Raumfrequenzen abgebildet. Mittels eines FFT-Formalismus wurde für jede Raumfrequenz die Frequenzantwort (SFR) berechnet, was, in den MTFs präsentiert, in Abb. 4 d resultiert.

Wie erwartet, erzielt man mit dem kleinsten Lochblendendurchmesser das beste Auflösungsvermögen. Allerdings ist zu bedenken, dass mit kleiner werdendem Blendendurchmesser, zur Verbesserung der Auflösung, gleichzeitig die Lichtstärke des Objektivs drastisch abnimmt. Der Siemensstern wurde, teilweise außerhalb des Gesichtsfeldes liegend, durch eine Optik ohne Trennwände (Abb. 5 a) und unter sonst gleichen Bedingungen durch ein Objektiv mit Trennwänden

(Abb. 5 b) abgebildet, um den Effekt der optischen Isolation auf die Unterdrückung des Übersprechens zwischen den Kanälen zu demonstrieren. Dies konnte durch quantitative Messungen der Antwort des Objektivs auf eine $0,65^\circ$ -ausgedehnte Quelle, die dem abbildenden System unter verschiedenen Einfallswinkeln innerhalb und außerhalb des Gesichtsfeldes präsentiert wurde, bestätigt werden (Abb. 5 c). Auf diese Weise kann folglich selbst für beliebig ausgedehnte Gesichtsfelder ein funktionstüchtiges und ultradünnes Bilderfassungssystem, basierend auf künstlichen Facettenaugen, realisiert werden.

Zusammenfassung

Wir demonstrieren einen neuartigen optischen Sensor, basierend auf künstlichen Facettenaugen. Die Baulänge des realisierten Objektivs beträgt nur 0,2 mm, es resultiert eine Auflösung von 60×60 Bildpunkten. Experimentelle Ergebnisse zeigen die hervorragende Eignung dieses Konzeptes für Gesichtserkennung.

Danksagung

Wir bedanken uns für die freundliche Leihgabe des CMOS-Sensors durch F. Heitger und P. Nussbaum vom Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) (Bio-inspired Systems-Microelectronics Division), Neuchâtel, Schweiz.

Literatur:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Völkel, R.; Bräuer, A.: „Bilderfassungssystem und dessen Verwendung“, Deutsche Patentanmeldung 10 2004 003 013.8 (2004).
- /2/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: „Artificial apposition compound eye – fabricated by micro-optics technology,“ *Appl. Opt.* 43(22), (2004) pp. 4303–4310.
- /3/ Ruedi, P.-F.; Heim, P.; Kaess, F.; Grenet, E.; Heitger, F.; Burgi, P.-Y.; Gyger, S.; Nussbaum, P.: „A 128 x 128 Pixel 120-dB Dynamic-Range Vision-Sensor Chip for Image Contrast and Orientation Extraction,“ *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 38(12), (2003) pp. 2325–2333.
- /4/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Nussbaum, P.; Heitger, F.; Tünnermann, A.: „Ultra-Thin Camera Based on Artificial Apposition Compound Eyes“, E-2, in *Proceedings of the 10th Microoptics Conference*, ISBN: 3-8274-1603-5, Elsevier GmbH, 2004.

Abb. 4: Auflösungsvermögen der künstlichen Facettenaugenkamera ...

Fig. 4: Resolution of the artificial compound eye camera ...

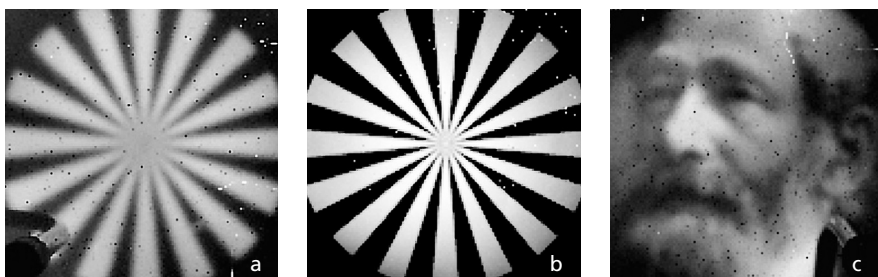


Abb. 4 a: Abgebildeter Siemensstern.
Abb. 4 b: Siemensstern, abgebildet durch klassisches Objektiv mit $1/3''$ Bildformat zum Vergleich.
Abb. 4 c: Abbild von Carl Zeiss.

Fig. 4 a: Radial star pattern.
Fig. 4 b: Radial star pattern imaged by bulk $1/3''$ format objective for comparison.
Fig. 4 c: Image of Carl Zeiss.

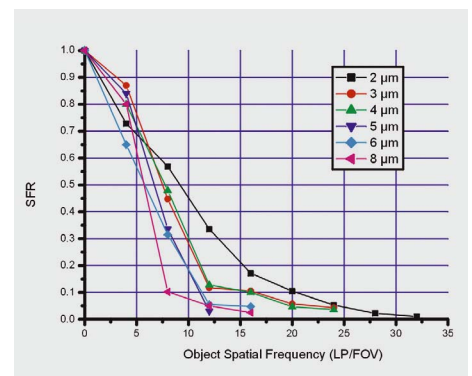


Abb. 4 d: MTF der Facettenaugenkamera mit Lochblendendurchmesser als Parameter.

Fig. 4 d: MTF of compound eye camera with pinhole diameter as the parameter.

Fig. 4 c shows the caption of a portrait-photograph of Carl Zeiss demonstrating the capability of face recognition. This is of particular interest for several applications such as security surveillance, automotive sensors and identification. For a quantitative MTF-determination, bar targets of different spatial frequencies were imaged. Each signal frequency response (SFR) was calculated using an FFT-formalism resulting in the MTFs presented in Fig. 4 d.

As expected the smallest pinhole size leads to the best MTF-characteristics. However using small pinholes for improvement of resolution of the compound eye camera results in a lower sensitivity.

For evaluation of cross talk the radial star pattern was imaged off-axis by a system without opaque walls (Fig. 5 a) under the same conditions as by a system including an optical isolation between ommatidia (Fig. 5 b).

The use of opaque walls for blocking off light from outside the FOV prevents the formation of ghost images and the image contrast is consequently improved. This was confirmed by a quantitative measurement of the response of the objective to a 0.65°-extended source presented to the imaging system under different angles of illumination inside and outside the FOV (Fig. 5 c). Thus a fully operational ultra-thin imaging device based on artificial compound eyes even for arbitrary large illuminated FOV has been achieved.

Summary

We demonstrated a novel optical sensor system based on artificial compound eye vision with an optics-thickness of approximately 0.2 mm and a resolution of 60 x 60 pixels. The experimental results show the suitability of the artificial apposition compound eye concept for face recognition.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the provision of the opto-electronic vision sensor by F. Heitger and P. Nussbaum of the Bio-inspired Systems-Microelectronics Division of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), Neuchâtel, Switzerland.

References:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Völkel, R.; Bräuer, A.: „Bildfassungssystem und dessen Verwendung“, Deutsche Patentanmeldung 10 2004 003 013.8 (2004).
- /2/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: „Artificial apposition compound eye – fabricated by micro-optics technology,“ Appl. Opt. 43(22), (2004) pp. 4303–4310.
- /3/ Rüedi, P.-F.; Heim, P.; Kaess, F.; Grenet, E.; Heitger, F.; Burgi, P.-Y.; Gyger, S.; Nussbaum, P.: „A 128 x 128 Pixel 120-dB Dynamic-Range Vision-Sensor Chip for Image Contrast and Orientation Extraction,“ IEEE Journal of Solid-State Circuits 38(12), (2003) pp. 2325–2333.
- /4/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Nussbaum, P.; Heitger, F.; Tünnermann, A.: „Ultra-Thin Camera Based on Artificial Apposition Compound Eyes“, E-2, in Proceedings of the 10th Microoptics Conference, ISBN: 3-8274-1603-5, Elsevier GmbH, 2004.

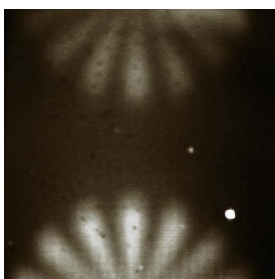


Abb. 5 a:
Geisterbild (oberer Teil) durch Übersprechen zwischen den Kanälen.

Fig. 5 a:
Ghost image (upper part) due to cross talk.

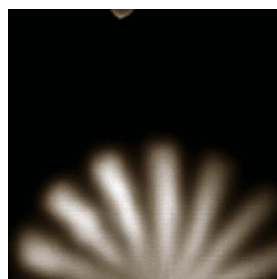


Abb. 5 b:
Durch die Einführung absorbierender Wände können Geisterbilder zwischen den Kanälen unterdrückt werden.

Fig. 5 b:
Ghost images are suppressed by the inclusion of opaque walls.

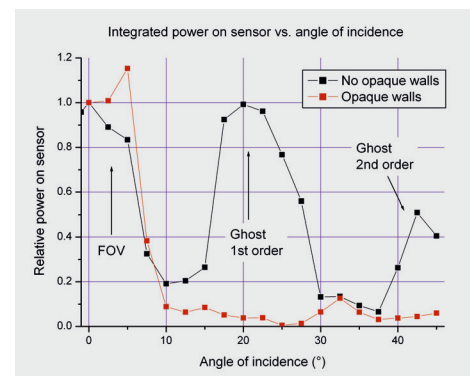


Abb. 5 c:
Quantitative Bestätigung des Effektes der absorbierenden Wände.

Fig. 5 c:
Quantitative measurement of the effect of opaque walls.