



Doctoral Thesis

Bio-inspired optical flow vision sensors for visual guidance of autonomous robots

Author(s):

Möckel, Rico

Publication Date:

2012

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009779616> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 20736

Bio-Inspired Optical Flow Vision Sensors for Visual Guidance of Autonomous Robots

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
RICO MÖCKEL
Dipl. Ing., University of Rostock
born 02. Februar 1981
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Rodney Douglas, examiner
Dr. Shih-Chii Liu, co-examiner
Prof. Dr. Tobias Delbrück, co-examiner
Prof. Dr. Auke Jan Ijspeert, co-examiner

2012

Abstract

Visual perception - the ability to interpret the environment by sensing light - is an impressive ability of biological organisms. Vision allows animals and human beings to explore and to interact with their environment. It is a daily task biological organisms seem to perform with very little effort. Even smallest insects with a body size in the range of millimeters depend on vision as a main source of feedback for their behavior control which includes impressive flight and landing skills. Despite the efforts of many researchers in mimicking these skills in artificial systems, biological vision systems are still more powerful, versatile and efficient than any artificial systems developed so far. Nature has evolved integrated and compact solutions where the vision system is well-adjusted to the properties of the sensory-motor control system and the physical body of the biological organism - properties that artificial systems still lack.

Optical flow is a major visual sensor cue used by animals in navigating their environment. Optical flow is due to the relative motion of the vision system and the objects in its environment. It encodes information about the shape and position of objects as well as the self-motion of the animal. This information is used extensively in particular by insects such as flies and bees in flight control.

Because of the impressive properties of biological systems, various groups have designed and implemented sensors in analog Very Large Scale Integrated (aVLSI) technology that mimic biological optical flow processing on various levels of abstraction. In parallel with recent efforts to construct miniature aerial platforms, optic flow information from camera sensors together with gyroscope outputs are used on such platforms to demonstrate properties such as autonomous flight.

At the EPFL Laboratory of Intelligent Systems, Jean-Christophe Zufferey and others developed a 10-gram indoor airplane and demonstrated autonomous wall avoidance. The airplane uses an off-the-shelf one-dimensional image sensor from which optical flow caused by the relative motion of objects on the left and right side of the airplane is extracted. Optical flow is computed on a microcontroller that is also running the control

loops steering the airplane's behavior.

Analog VLSI optical flow sensors can allow such an airplane to leave the controlled conditions of a lab environment and to free the microcontroller from the optical flow computation. These sensors implement circuits both for phototransduction - the conversion of light into electrical signals - and optical flow processing. At the Institute of Neuroinformatics several researchers developed monolithic optical flow sensors. Jörg Kramer for example presented a suite of time-of-travel sensors that extract contrast edges from the visual stimuli presented to the sensor and successfully extract optical flow by measuring their time-of-travel - the time these contrast edges require to travel the distance between adjacent sensor pixels.

This thesis contributes to the evaluation and design of optical flow sensors suitable for miniature flying platforms, and to investigations into optical flow algorithms and flight control strategies suitable for control of autonomous robots.

This thesis addresses a major drawback of existing time-of-travel sensors: the sensors presented so far showed optical flow outputs that depended both on stimulus velocity and stimulus contrast making the interpretation of these outputs for steering autonomous robots challenging. This contrast dependence is caused because the properties of the event signals that are generated when contrast edges are detected depend on stimulus contrast. As a first achievement this thesis presents a novel edge detection circuit that does not suffer from this problem. The circuit uses two thresholds to trade the minimum stimulus contrast that is required to emit an edge detection event and the maximum amplitude of signal noise that is rejected. The novel edge detection circuit is demonstrated as part of a one-dimensional time-of-travel optical flow sensor implemented in aVLSI technology. The algorithm implemented on this sensor design was chosen after careful consideration of the existing optical flow sensors and the intended flying platform. The sensor adapts over 4 orders of background light intensities and due to the novel edge detection circuit extracts optical flow information for stimulus contrasts down to 2.5%. Measurements from the sensor are presented when being operated on a rotating platform. Furthermore, the sensor is demonstrated in a closed-loop control application for steering a simulated car.

The second achievement is the creation of a miniaturized optical flow sensor module. The combination of analog VLSI vision sensors with classical machine vision techniques is challenging but can be beneficial for autonomously flying micro aerial vehicles (MAV) and autonomous robots in general. This thesis presents a continuous-time custom aVLSI vision sensor that implements circuits for phototransduction, filtering and amplification of photoreceptor signals. The sensor is adapting over four orders of back-

ground light intensities. In combination with a plastic lens a 0.3-gram vision sensor module for miniature aerial platforms is created which is sufficiently lightweight so that 3 vision sensor modules can be carried by small MAVs like the 10-gram airplane by Zuffery et. al. Optical flow is computed on a separate microcontroller using the Image Interpolation Algorithm by M. V. Srinivasan that integrates the optical flow across sensor pixel. Experiments are presented where similarly as suggested by Zufferey et al. the optical flow extracted from the output signals of this vision sensor is compared to the readings from a gyroscope. Comparisons between the outputs of both sensors show encouraging results suggesting that the adaptive vision sensor is well suited for visual guidance of autonomous robots.

As a third achievement this thesis presents an analysis of the current state-of-the-art control strategy where the distance-dependent translational optical flow component is extracted by measuring the total flow with an optical flow sensor and subtracting the rotational component estimated by a gyroscope. The analysis concludes that although the currently used airplanes and control strategy are successful, distance estimation with optic flow sensors is more efficient when the autonomous robots mimic the flight behavior demonstrated by flies. These insects show flight behavior that alternates between periods of straight flight - best suited for extraction of the distance to obstacles with optical flow - and fast turns - commonly referred to as flight saccades. The reproduction of this flight behavior by artificial systems is challenging. MAVs that are capable of performing saccades need to be used. Such MAVs are typically passively unstable and thus would need to be actively stabilized but the quality of the distance estimates extracted from optic flow sensors as well as the maneuverability of the autonomous systems would largely benefit.

With the presentation of novel optical flow sensor solutions, the analysis of existing sensors, MAVs and control strategies this thesis provides important steps towards more powerful optical flow guided autonomous robots.

Zusammenfassung

Biologische Organismen haben die beeindruckende Fähigkeit ihre Umgebung allein auf Basis von visuellen Reizen wahrnehmen zu können. Sehen erlaubt Tieren und Menschen ihre Umgebung zu erforschen und mit ihr zu interagieren. Es ist eine Tätigkeit, die biologischen Organismen scheinbar ohne nennenswerten Aufwands jeden Tag verrichten. Sogar kleine Insekten mit einer Körpergrösse von wenigen Millimetern verwenden visuelle Reize zur eigenen Verhaltenssteuerung. Dieses Verhalten schliesst die beeindruckenden Flug- und Ladefähigkeiten der Insekten ein. Trotz des grossen Aufwandes, den eine Vielzahl von Wissenschaftlern betreiben, um diese Fähigkeiten mittels künstlicher Systeme zu kopieren, sind biologische visuelle Wahrnehmungssysteme immer noch viel leistungsstärker, vielseitiger und effizienter als jedes bisher entwickelte künstliche System. Mittels Evolution hat die Natur integrierte und kompakte Lösungen geschaffen, in denen die visuelle Wahrnehmungssysteme an die Sensor-Motor-Kontrollsysteme und die physikalischen Körpereigenschaften perfekt angepasst sind. Diese Anpassung fehlt bei künstlichen Systemen noch immer.

Eine wichtige visuelle Informationquelle, die Tiere verwenden, um sich in einer Umgebung zu orientieren ist Optischer Fluss. Dieser entsteht durch die relative Bewegung des Wahrnehmungssystems zu den Objekten in der Umgebung. Optischer Fluss enthält Informationen sowohl über die Form und Position der Objekte als auch über die Eigenbewegung des Tieres. Diese Informationen werden insbesondere von Insekten wie Fliegen und Bienen exzessiv für die Flugsteuerung verwertet.

Die beeindruckenden Fähigkeiten von biologischen Systemen haben eine Vielzahl von Forschungsgruppen dazu veranlasst, Sensoren in Form von hochintegrierten Systemen zu kreieren und implementieren, welche die Form der Verarbeitung des Optischen Flusses von biologischen Systemen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen kopieren. Parallel zu den kürzlich erfolgten Investitionen in die Konstruktion von Miniaturflugkörpern, wurde von Kameras generierter Optischer Fluss mit Messungen von einem Gyroskop kombiniert um autonomen Flug zu demonstrieren.

Am Labor für Intelligente System des EPFL haben J. C. Zufferey und andere ein 10-Gramm Innenraumflugzeug entwickelt, das beim Fliegen selbstständig Zusammenstöße mit den Wänden des Raumes vermeidet. Das Flugzeug verwendet dazu eine eindimensionale Standardkamera aus deren Bildern der von Objekten zur rechten und linken Seite des Flugzeuges verursachter Optischer Fluss berechnet wird. Die Berechnung übernimmt dabei derselbe Mikroprozessor, der auch den Kontrollalgorithmus des Flugzeuges beherbergt.

Analoge hochintegrierte Sensoren zur Messung des Optischen Flusses könnten es einem solchen Flugzeug erlauben die kontrollierte Umgebung eines Labors zu verlassen und dazu beitragen den Mikroprozessor von der aufwendigen Aufgabe der Berechnung des Optischen Fluss zu befreien. Diese Sensoren integrieren Schaltkreise, die Licht in elektrische Signale umwandeln und aus diesen den Optischen Fluss berechnen. Am Institut für Neuroinformatik haben mehrere Wissenschaftler monolithische Sensoren zur Messung des Optischen Flusses entwickelt. J. Kramer zum Beispiel hat eine Vielzahl von sogenannter "time-of-travel" Sensoren präsentiert, die erfolgreich den Optischen Fluss bestimmen, indem sie die Zeit messen, die eine Kontraständerung benötigt um zwei benachbarte Sensorpixel zu passieren.

Diese Doktorarbeit leistet Beiträge zur Analyse und zum Design von Sensoren zur Messung des Optischen Flusses bei Miniaturflugkörpern und zur Untersuchung von Algorithmen zur Messung des Optischen Flusses und zur Steuerung von autonomen Robotern.

Diese Doktorarbeit befasst sich mit einem wichtigen Nachteil derzeit existierender "time-of-travel" Sensoren: Die bisher vorgestellten Sensoren verfügen über einen Messausgang, dessen Wert sowohl von der Geschwindigkeit der visuellen Stimuli als auch von deren Kontrast abhängt. Diese Abhängigkeit macht die Interpretation der Messwerte und die Verwendung der Sensoren zum Ansteuern von autonomen Robotern schwierig. Die Kontrastabhängigkeit beruht darauf, dass die Eigenschaften der elektrischen Signale, die bei Erkennung einer Kontraständerung erzeugt werden, von der Amplitude der Kontraständerung anhängen. Eine erste Errungenschaft dieser Doktorarbeit ist eine neue Schaltung zur Erkennung von Kontraständerungen, die nicht unter diesem Problem leidet. Die Schaltung verwendet zwei Schwellwerte mit denen sich die minimale Kontraständerung, die benötigt wird, um ein Änderung am Schaltungsausgang zu erzeugen, sowie die maximale Rauschamplitude, die ausgesondert wird, einstellen lassen. Die Schaltung zur Detektion von Kontraständerungen wird als Teil eines eindimensionalen hochintegrierten "time-of-travel" Sensors zur Messung des Optischen Flusses demonstriert. Der für diesen Sensor verwendete Algorithmus wurde

nach sorgfältigem Studium bereits existierender Sensoren zur Optischen Fluss Messung und der fliegenden Plattform, für die der Sensor geplant wurde, ausgewählt. Der Sensor passt sich an die sich verändernde Hintergrundbeleuchtung über vier Dekaden an. Dank des neuen Schaltkreises zur Detektion von Kontraständerungen misst der Sensor Optischen Fluss für Kontraständerungen bis runter zu 2.5%. Sensordaten werden präsentiert, die gemessen wurden, während der Sensor auf einer rotierenden Plattform getestet wurde. Ausserdem wird der Sensor als Teil einer Regelungsschleife zur Steuerung eines computersimulierten Autos demonstriert.

Die zweite Errungenschaft ist die Erzeugung eines miniaturisierten Sensormodules zur Messung des Optischen Flusses. Die Kombination von analogen hochintegrierten visuellen Sensoren mit klassischen rechnergestützten Verfahren zur Bildverarbeitung ist kompliziert aber auch lohnenswert für autonome miniaturisierte Flugmaschinen und autonome Roboter im Allgemeinen. Diese Doktorarbeit präsentiert einen massgefertigten analogen hochintegrierten Sensor zur visuellen Wahrnehmung, der Schaltkreise für die Umwandlung von Licht in elektrische Signale sowie deren Filterung und Verstärkung implementiert. Der Sensor passt sich an die sich verändernde Hintergrundbeleuchtung über vier Dekaden an. In Kombination mit einer Plastiklinse entsteht ein 0.3 Gramm Sensor zur visuellen Wahrnehmung für miniaturisierte Flugkörpern. Das geringe Gewicht des Sensormodules erlaubt eine einfache Integration von mindestens 3 Sensormodulen auf miniaturisierte Flugmaschinen wie dem 10 Gramm Flugzeug von Zufferey und anderen. Der Optische Fluss wird auf einem separaten Mikroprozessor unter Verwendung des Bildinterpolationsalgorithmus von M. V. Srinivasan berechnet. Dieser Algorithmus integriert den Optischen Fluss über mehrere Sensorpixel. Es werden Experimente präsentiert, in denen - ähnlich wie von J. C. Zufferey und anderen vorgeschlagen - der vom Sensor extrahierte Optische Fluss mit den von einem Gyroskop gewonnenen Daten verglichen wird. Der Vergleich liefert ermutigende Resultate, die darauf hindeuten, dass der Sensor für die visuelle Steuerung von autonomen Robotern gut geeignet ist.

Als dritte Errungenschaft präsentiert diese Doktorarbeit eine Analyse der derzeit aktuellen Steuerungsstrategie, bei der die distanzabhängige durch Translation erzeugte Komponente des Optischen Flusses ermittelt wird, indem mittels eines Optischen Fluss Sensors der totale Fluss gemessen und anschliessend die durch ein Gyroskop ermittelte Komponente des Optischen Flusses, die durch Rotation entsteht, subtrahiert wird. Die Analyse kommt zu dem Schluss, dass obwohl die derzeit verwendeten Flugzeuge und Steuerungsstrategie erfolgreich sind, die Distanzbestimmung mit Sensoren zur Messung des Optischen Flusses effizienter wäre, wenn die autonomen Roboter das Flugverhalten von Fliegen kopieren würden. Diese Insekten zeigen ein Flugverhalten,

bei dem sich Zeiten, in denen die Fliege geradeaus bewegt - was optimal zur Distanzbestimmung mit Optischem Fluss ist -, mit Zeiten abwechseln, in denen die Fliege schnelle Drehungen - sogenannte Saccaden - ausführt. Die Reproduktion dieses Flugverhaltens durch künstliche Systeme ist eine Herausforderung. Es müssten Miniaturflugkörper verwendet werden, die zur Ausführung von Saccaden fähig sind. Diese Flugkörper sind normalerweise passiv instabil und müssen aktiv stabilisiert werden. Dafür wären die Distanzbestimmungen mit Sensoren zur Messung des Optischen Flusses von besserer Qualität und die autonomen Systeme wären wendiger.

Mit der Demonstration von neuartigen Sensorlösungen zur Messung des Optischen Flusses, der Analyse existierender Sensoren, Miniaturflugkörper und Steuerungsstrategien präsentiert diese Doktorarbeit wichtige Schritte in Richtung leistungsstärkerer autonomer Roboter, die mit Hilfe von Messungen des Optischen Fluss gesteuert werden.