



Universität Karlsruhe

Fakultät für Informatik

Institut für Rechnerentwurf und Fehlertoleranz

Seminar „Informationsverarbeitung in Lebewesen“  
im Sommersemester 2003

## Visuelle Odometrie bei Fluginsekten

Hans-Joachim Daniels

Betreuer: Patrick Rößler

21. Juli 2003

### **Zusammenfassung**

Spurbienen können ihrem Volk mit Hilfe ihres Tanzes die Entfernung zu einer Futterstelle mitteilen. Andere Bienen können sich darauf verlassen und tun dies auch erfolgreich. Aber wie messen Bienen mit ihrem kleinen Hirn auch größere Entfernungen erstaunlich genau? Neueste Forschung weisen darauf hin, dass sie nicht, wie lange vermutet, ihren Energieverbrauch messen, sondern die wahrgenommene Winkelgeschwindigkeit ihrer Umgebung aufintegrieren. Dabei sind sie nicht von der Struktur ihrer Umgebung abhängig, sondern nur von der Geschwindigkeit, in der ihre Umgebung an ihnen vorbeizieht.

Wie dies genau geschieht ist noch unklar, aber die Elementarbewegungsdetektoren nach Reichardt/Hassenstein scheinen trotz ihrer Abhängigkeit von der Umgebungsstruktur eine gute Erklärung dafür zu liefern.

Auch wurde versucht, die erworbenen Kenntnisse in Flugrobotern anzuwenden um ihnen die Fähigkeit zu geben, auch bei ungenauen GPS-Signalen oder Ähnlichem ihre aktuelle Position und die geflogene Strecke zu messen. Nachdem über Untersuchungen an Bienen berichtet wurde und auf die dazugehörigen theoretischen Grundlagen eingegangen wurde, wird ein solcher Prototyp vorgestellt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Gliederung . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Beobachtung bei Fluginsekten</b>	<b>1</b>
2.1	Bienen und Entfernungsmessen . . . . .	1
2.2	Energieverbrauch vs. Visuelle Hinweise . . . . .	2
2.3	Mögliche Messgrößen zur Entfernungsmessung . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Technische Erklärungsversuche und Umsetzung</b>	<b>6</b>
3.1	Elementarbewegungsdetektor . . . . .	6
3.1.1	Prinzipieller Aufbau . . . . .	6
3.1.2	Unabhängigkeit von der räumlich-zeitlichen Struktur . . . . .	6
3.2	Iidas Blimp . . . . .	7
3.2.1	Aufbau . . . . .	7
3.2.2	Tests . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>11</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Unter Odometrie versteht man die relative Orts- und Richtungsangabe bezüglich eines Referenzpunktes [Kal96], wobei es in dieser Arbeit hauptsächlich um die Entfernungsmessung geht. Insekten (hier insbesondere Bienen) können Entfernungen trotz ihrer geringen Hirnmasse relativ gut messen. Für die Robotik ist dies deshalb äußerst interessant, da dies eine Möglichkeit verspricht, sehr billig das Gleiche tun zu können ohne auf externe Sensoren angewiesen zu sein. Odometrie in Radfahrzeugen ist recht verbreitet, aber in einem Flugkörper kann nicht die für den Antrieb aufgewendete Kraft als Maßstab für die zurückgelegte Entfernung dienen. Gegenwind z.B. ist hier nicht ohne weiteres einrechenbar, da die Bewegung in der Luft nicht wie bei Rädern direkt auf den Antrieb zurückwirkt und diesem mehr oder weniger Widerstand leistet.

## 1.2 Gliederung

Im ersten Teil des nächsten Kapitels stelle ich kurz vor, wie Bienen es einem Forscher besonders leicht machen, mit ihnen Odometrieversuche anzustellen. Im Anschluss wird über zwei Experimente mit Bienen berichtet, einmal im Freien und beim zweiten Versuch in einer kontrollierten Laborumgebung. Bei beiden Versuchen wird untersucht, was für Signale Bienen verwenden um die zurückgelegte Entfernung zu messen. Im dritten Kapitel wird es darum gehen, wie man technisch mit möglichst wenig Aufwand Bewegung oder besser Geschwindigkeit messen kann. Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels stelle ich eine Forschungsarbeit von Iida Fumiya vor, in der er die theoretischen Erkenntnisse über Odometrie in Fluginsekten anhand eines Blimps in die Praxis umgesetzt hat. Als Abschluss folgt dann eine Zusammenfassung.

# 2 Beobachtung bei Fluginsekten

## 2.1 Bienen und Entfernungsmessen

Bienen eignen sich im Gegensatz zu anderen Fluginsekten deshalb so gut für Odometrieexperimente, da sie mit dem Bientanz eine Sprache benutzen, die auch für Menschen einigermaßen verständlich ist.

Bienen setzen für die Suche nach neuen Nahrungsquellen oder Nistplätzen sogenannte Spurbienen als Scouts ein. Diese gehen auf die Suche und teilen dem Stock die Ergebnisse ihrer Suche mit Hilfe ihres Tanzes mit. Diese können auch im Dunklen dem Tanz die Informationen entlocken, die sie dann auch zum Ziel führen. Das setzt voraus, dass die Messung der Spurbiene entweder hochpräzise oder zumindest für die anderen Bienen nachvollziehbar

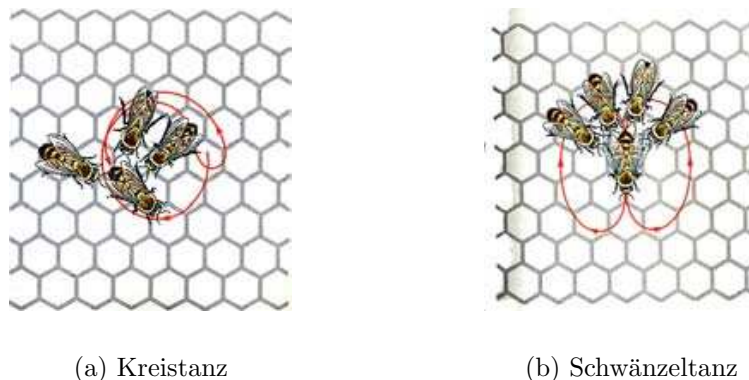


Abbildung 1: Die Tanzformen von Bienen (aus [Mas02])

ist. Die hier präsentierten Ergebnisse lassen vermuten, dass dies der Fall ist, da auch die anderen Bienen meistens den selben Weg wie die Spurbiene wählen (vgl. [EB96]).

Die Entfernung zum Ziel wird mit dem Tempo des Tanzes ausgedrückt, mehr Schwänzelmovements pro Sekunde drücken eine höhere Entfernung aus. Andere Quellen messen in Schwänzelmovement pro Durchlauf. Ist das Ziel weniger als 50-100 m in natürlicher Umgebung (siehe nächstes Kapitel) entfernt, ist die Tanzform der sogenannte Kreistanz 1(a) [SZAT00] [Mas02]. Im Kreistanz wird keine Richtung ausgedrückt. Beim Schwänzeltanz 1(b) gibt die Achse der liegenden Acht die Richtung zum Futterplatz relativ zum aktuellen Sonnenstand an. Die Richtung wird immer an den aktuellen Sonnenstand angepasst.

## 2.2 Energieverbrauch vs. Visuelle Hinweise

Über die Art und Weise, wie Bienen die zurückgelegte Entfernung messen, gibt es seit Jahrzehnten eine große Debatte in der Biologie [EB96]. Ein Experiment von Heran und Wanke 1952 [HW52] in dem Bienen an einem steilen Berghang bergauf bzw. bergab zur Futterstelle fliegen mussten, gab den Anlass dafür, dass Karl von Frisch, Nobelpreisträger 1973 für die Entschlüsselung des Bientanzes, schloss, dass die beim Flug zur Futterstelle verbrauchte Energie das Maß für die zurückgelegte Entfernung sein müsse [vF67]. Jedoch lieferten nur zwei von sieben Versuchen ein dazu passendes Ergebnis, bei den anderen Versuchen meldeten die Bienen keine signifikanten Entfernungsunterschiede. Als mögliche Erklärung gab er eine optische Untersuchung der überflogenen Strecke durch die Bienen an, denn Bienen, die in einem anderen Versuch über einen See flogen, meldeten nämlich statt 383 m 80 m weniger. Bei Gegenwind war dies jedoch umgekehrt der Fall. Von Frisch mittelte die Ergebnisse und zusammen ergab sich kein Unterschied. Für von Frisch war dies nicht Grund genug, die Energiehypothese zu verwerfen, auch wenn er angab, dass man die optische Struktur des Untergrunds nicht als Hilfsmittel für die Entfernungsmessung ausschließen könne.

1990 wurde das Experiment wiederholt [GE90]. Diesmal ergaben sich wieder keine Unter-

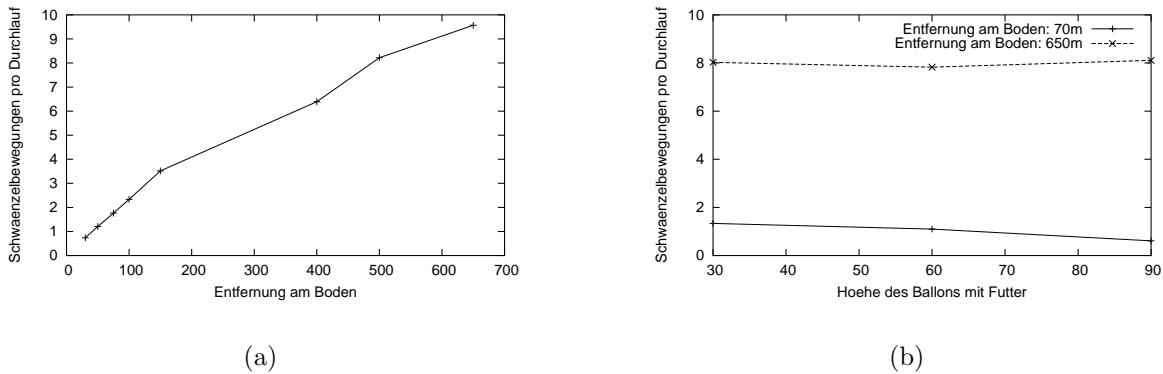


Abbildung 2: Meldung der Spurbienen bei Futter in Bodenhöhe (2(a)) bzw. in angegebener Höhe (2(b)) (nach [EB95])

schiede zwischen Bienen, die bergauf bzw. bergab flogen.

Ein weiteres Experiment ist in [EB95] beschrieben. Hier wurde das Zuckerwasser als Belohnung an einem Wetterballon befestigt und die von den Sammlerbienen gemeldete Entfernung zum Futter gemessen. Die hierbei gemessenen Ergebnisse widersprechen der Energiehypothese komplett, da bei 70 m Entfernung am Boden die gemeldete Entfernung des Zuckerwassers bei steigender Ballonhöhe abnahm, der Energieverbrauch jedoch stark ansteigt. Optischer Fluss als Messgrundlage liefert hierzu jedoch eine gute Erklärung. Die Bienen sind direkt auf den Ballon zugeflogen, so dass sie die gleiche Strecke bei höherem Ballon in größerer Höhe überflogen haben und somit die wahrgenommene Bodengeschwindigkeit kleiner wurde.

Bei einem weiteren Versuch wurde der Ballon in 650 m Entfernung hochgelassen. Die gemeldete Entfernung blieb jedoch jetzt relativ gleich, egal ob die Belohnung in 30 m oder 90 m Höhe aufgehängt war. Die Sammler meldeten ungefähr 500 m als Entfernung. Da die Flugbahn nicht gemessen werden konnte, kamen Esch und Burns zu dem Schluss, dass die Tiere zunächst am Boden entlang geflogen und erst nach ca. 500 m steil in die Höhe gestiegen sind (siehe Abbildung 2 für die gemeldeten Entfernungen).

## 2.3 Mögliche Messgrößen zur Entfernungsmessung

Um herauszufinden, was genau Bienen verwenden, um zurückgelegte Entfernung zu messen, unternahmen Srinivasan, Zhang und Bidwell folgende Versuchsreihe [SZB97]:

### Prinzipieller Versuchsaufbau

Wenn nicht anders angegeben, ist der Versuchsaufbau wie folgt (siehe Abbildung 3):

In jedem Experiment wurden 10-15 Honigbienen (*Apis mellifera*) darauf trainiert, Zuckerwasser an einer festen Stelle in einem 3,2 m langen, 22 cm breiten und 20 cm hohen Tunnel

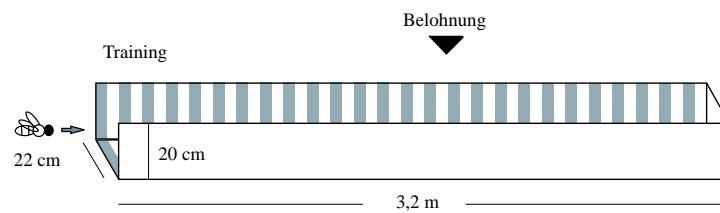


Abbildung 3: Aufbau des Versuchstunnels (aus [SZB97])

mit Plexiglasdach im Inneren eines großen Raumes zu finden. Die Wände und der Boden wurden mit einem Muster bezogen, dass aus senkrechten sich abwechselnden schwarzen und weißen Streifen der Breite 10 cm bestand. Während der Versuche wurde die Position des Tunnels öfters geändert um die Raumdecke als möglichen Bezugspunkt auszuschließen.

Der eigentliche Versuch bestand darin, dass das Zuckerwasser entfernt wurde und beobachtet wurde, wo die Bienen danach suchten. Die Bienen flogen über der vermuteten Stelle hin und her, wobei mittlere Suchposition und Standardabweichung gemessen wurden. In diesem Versuch wurde das Suchverhalten der einzelnen Bienen untersucht, nicht deren Meldung an den Stock.

Ohne Veränderung an der Suchanordnung waren die Bienen sehr gut in der Lage, den Ort, wo früher die Belohnung war, zu finden.

### Wird die Suchposition von den Landmarken in der Umgebung bestimmt?

Wenn dies der Fall wäre, dann müsste die scheinbare Größe des Tunnelein- bzw. Ausgangs eine Rolle für die Identifizierung der Futterposition spielen. Die Position des Tunnels im Raum wurde immer wieder verändert, so dass die Decke des Raumes für die Bienen keine visuelle Hilfe bieten konnte. Die Positionsänderungen beeinflussen die Bienen in ihrem Suchverhalten nicht, so dass man davon ausgehen kann, dass die Umgebung oberhalb der Bienen für deren Odometrie ohne Bedeutung ist. Der Sichtwinkel der Tunnelöffnung bzw. des Tunnelendes an der Futterposition blieb jedoch gleich. Damit könnte das ein Hinweis sein. Jedoch veränderte eine Blende am Eingang die Suchposition der Bienen nicht merklich.

Verlängert man jedoch den Tunnel an der Vorderseite, suchten die Bienen ziemlich genau an der gleichen relativen Entfernung zum Eingang wie vorher, ließen sich also vom weiter entfernt liegenden Ausgang nicht irritieren.

### **Zählen Bienen hervorstechende Merkmale?**

Auch wenn Bienen so etwas wie zählen können veränderte doch die Variation des Musters, mit dem der Tunnel bespannt war, nicht die mittlere Suchposition. Weder eine Verbreiterung bzw. Verschmälerung der Streifen, noch ein bei jedem Versuch neu erzeugtes Zufallsmuster veränderten diese merklich. Auch die visuelle Umgebung der Futterstelle änderte sich dadurch bei jedem Flug, ohne dass dies die Präzision der Bienen stark beeinflusste.

### **Spielt Energieverbrauch nicht doch eine Rolle?**

In diesen kontrollierten Laborbedingungen, wo die Flugroute der Bienen genau beobachtet werden konnte, kann man auch die Umgebungsbedingungen genau definieren. Um herauszufinden, ob Energieverbrauch oder Anzahl der benötigten Flügelschläge eine Rolle spielen, wurde im Tunnel ein Luftzug erzeugt. Wäre Energieverbrauch eine wichtige Größe zur Bestimmung der geflogenen Entfernung wichtige Größe, müssten die Bienen bei Rückenwind weiter vom Eingang entfernt, bei Gegenwind entsprechend weiter am Anfang suchen. Das Gegenteil war der Fall, auch vergrößerte sich die Standardabweichung von der mittleren Suchposition. Eine Ursache für dieses Verhalten ist noch nicht bekannt. Weder Energiehypothese noch das Aufintegrieren von beobachteter Winkelgeschwindigkeit liefert hierzu eine Erklärung.

### **Können Bienen Beschleunigung doppelt aufintegrieren?**

Nach  $s(T) = \int_{t_0}^T \int_{t_0}^T a(t) dt dt$  könnte man auch durch das doppelte aufintegrieren von gespürter absoluter Beschleunigung den zurückgelegten Weg bekommen. Um herauszufinden, ob dies bei Bienen der Fall ist, wurde der Tunnel gleichmäßig um die Hälfte seiner Länge verschoben, als die Bienen auf dem Hinflug zum Futterplatz waren. Die Bienen suchten jedoch auch dann immer noch genau an der gleichen Stelle relativ zum Tunneleingang, auch wenn sie 50% mehr bzw. weniger Strecke relativ zum Raum zurücklegten.

### **Abhängigkeiten von der Art der visuellen Reize**

In diesem Versuch wurde untersucht, ob Bienen darauf reagieren, ob sie nur den wahrgenommenen optischen Fluss beachten, oder ob sie Wände als Objekte erkennen und ihre Relativbewegung dazu berechnen. Im Versuch wurde statt des alten Tunnels ein weiterer bzw. engerer Tunnel für die Tests genommen. Zählt für die Bienen nur die Bewegung des wahrgenommenen Bildes, müsste den Bienen ein Flug durch einen engeren Tunnel weiter vorkommen als durch einen weiteren. Genau dies war auch der Fall.

Verwendet man dagegen statt vertikalen horizontale Streifen, so kamen die Bienen ganz aus dem Tritt. Sie waren nicht mehr in der Lage überhaupt Entfernung zu messen, was sich in einer Gleichverteilung der Suchpositionen im Tunnel niederschlug.

## Konsequenzen

Bis auf die Versuche mit Wind im Tunnel erklärt die These vom aufintegrierten optischen Fluss sämtliche beobachteten Phänomene. Sie stellt also eine gute Grundlage für eine Umsetzung für die Praxis in der Robotik dar. Dass die eigentliche Umgebung keine Rolle spielt zeigt auch, dass Sammelbienen, wenn sie in einem abgedunkelten Gefäß transportiert wurden, ziemlich genau auf der gleichen Flugroute, nur versetzt, fliegen um an den Ort zu kommen, an dem sie die Nahrung vermuten [Men01].

Diese Technik ermöglicht es Bienen mit ihrer geringen Hirnmasse sicher Orte wiederzufinden und auch anderen davon zu erzählen. Diese einfache und damit billige Technik bietet sich an, auch in künstliche Flugrobotern genutzt zu werden.

## 3 Technische Erklärungsversuche und Umsetzung

### 3.1 Elementarbewegungsdetektor

#### 3.1.1 Prinzipieller Aufbau

Werner Reichardt hat in seinen Untersuchungen mit dem Elementarbewegungsdetektor (EMD) den entscheidenden Grundstein für die Erforschung der Bewegungserkennung in Insekten gelegt [Rei69].

Der Elementarbewegungsdetektor besteht im Groben aus zwei Lichtsensoren, einer Verzögerungseinheit und einem Multiplikator (Abbildung 4(a)). Um konstante Beleuchtung nicht als Bewegung zu erkennen wird den Sensoren jeweils ein Hochpassfilter nachgeschaltet. Nur wenn Licht erst auf den linken und  $\tau$  Zeiteinheiten danach auf den rechten Sensor fällt wird das Produkt groß. Bei sich wiederholenden Mustern kann der Halbdetektor schwer die Bewegungsrichtung unterscheiden. Helligkeitsschwankungen werden zudem als Bewegung gemeldet. Um diesen Mangel loszuwerden kann man zwei dieser Halbdetektoren miteinander koppeln (Abbildung 4(b)). Deren Ausgaben werden, evtl. die einer Seite mit einem Gewichtungsfaktor  $\alpha$  multipliziert, addiert. Auf diese Weise löschen sich Helligkeitsänderungen, die mit beiden Sensoren gleichzeitig empfangen werden, gegenseitig aus. Dies geht allerdings zu Lasten der Unabhängigkeit von der Umgebungsstruktur (siehe 3.1.2).

#### 3.1.2 Unabhängigkeit von der räumlich-zeitlichen Struktur

Beim Volldetektor besteht das Problem, dass dieser bei schnellen hell/dunkel-Änderungen stark anschlägt, unabhängig davon, ob diese durch eine schnelle Bildbewegung oder durch ein hochfrequentes Muster hervorgerufen wurden, da hierbei verzögert erst auf den einen und dann auf den anderen Sensor Licht fällt [ZSE99] [Iid00].



Dies macht einen Vergleich von gemessenen Entfernungen in verschiedenen oder veränderten Umgebungen unmöglich, was ja gerade ein Vorteil von visueller Odometrie sein sollte. Auch wiesen oben genannte Versuche darauf hin, dass für Bienen nur die tatsächliche Bildbewegung eine Rolle spielt und nicht die räumlich-zeitliche Frequenz.

In [ZSE99] wurde simuliert bzw. berechnet, wie verschieden gewichtete Reichardt-detektoren auf tatsächliche Bildgeschwindigkeit und Bildstruktur ansprechen. Heraus kam, dass Halbdetektoren von der räumlich-zeitlichen Struktur unabhängig sind, die Geschwindigkeit jedoch nicht eindeutig bestimmen können (die Ausgabefunktion eines Halbdetektors ist nicht injektiv, sondern hat ein Maximum, dessen Lage von der Verzögerung  $\tau$  bestimmt wird). Mehrere Halbdetektoren mit verschiedenen Verzögerungszeiten können zusammen Geschwindigkeiten eindeutig bestimmen. Ungleich gewichtete Volldetektoren sind in ihrem Verhalten zwischen Voll- und Halbdetektor angesiedelt. Man kann Volldetektoren auch einzeln auslesen um sowohl die genaue Richtungsbestimmung des Volldetektors wie auch die genaue Bildgeschwindigkeitsbestimmung des Halbdetektors ohne zusätzliche weitere Detektoren zu bekommen.

Ob Bienen diesen Mechanismus wirklich nutzen oder nicht ist unbekannt. Es gibt allerdings Hinweise in diese Richtung [EBR89]. Ob dies überhaupt nötig ist, ist nicht einmal gesichert [DOL00]. Die Versuche mit EMDs wurden meistens mit sinusförmigen Mustern gemacht. Ein typisches Ergebnis dessen, was EMDs hier messen zeigt Abbildung 5. Diese weisen naturbedingt nur ein sehr geringes Frequenzspektrum auf. Wie verhalten EMDs sich aber, wenn man mit ihnen bewegte Bilder wie sie in der Natur vorkommen untersucht (siehe Abbildung 7)? Diese enthalten ein wesentlich höheres Frequenzspektrum. Dieses schlägt sich darin nieder, dass die absolute Höhe der Ausgabe der EMDs zwar durchaus vom Bild abhängt, die Kurven auf eine gemeinsame Höhe normalisiert jedoch fast identisch sind (siehe Abbildung 6). Die Frage ist jedoch, ob Fluginsekten diese Kurven abhängig von der Umgebungsstruktur skalieren können oder nicht. Ob dies wirklich der Fall ist, muss noch untersucht werden.

## 3.2 Iidas Blimp

Ein EMD ist einfach aufzubauen und erfordert beim Auslesen nur sehr wenig Rechenleistung. Diese Art, ein billiges System zur visuellen Kursstabilisation und Odometrie aufzubauen zu können, brachte Fumiya Iida dazu, dieses in der Realität und nicht nur in einer Simulation auszuprobieren [Iid00] [Iid01] [IL00].

### 3.2.1 Aufbau

*Melissa* (siehe Abbildung 8) ist ein Blimp-artiger Flugroboter. An der Gondel ist das Panoramasishtsystem befestigt, das  $360^\circ$  horizontal und  $260^\circ$  vertikal abdeckt. Das Sichtfeld ist in einen rechten und einen linken Teil (HR bzw. HL) unterteilt und für das Odometrie werden beide getrennt ausgelesen. Die Videodaten werden per Funk an einen Rechner übermittelt, da der Blimp nur 500 g tragen kann und die zusätzliche Hardware zu schwer

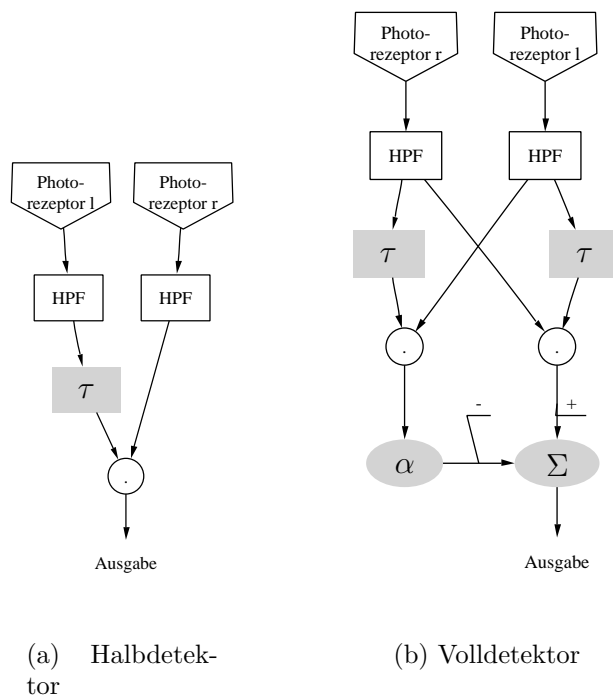


Abbildung 4: Elementarbewegungsdetektor nach Hassenstein/Reichardt (nach [D'Z03] bzw. [ZSE99])

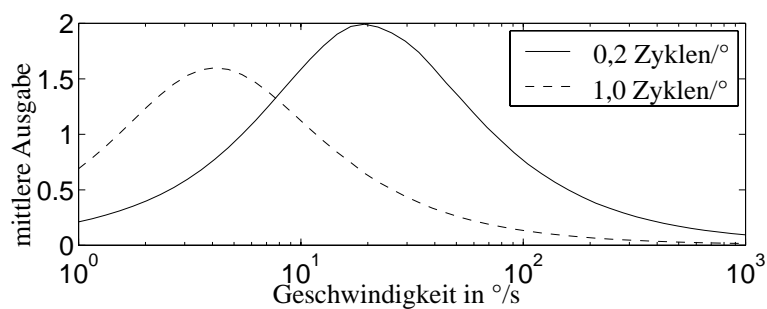
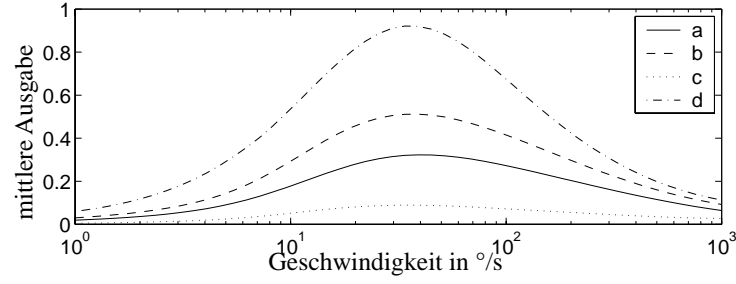
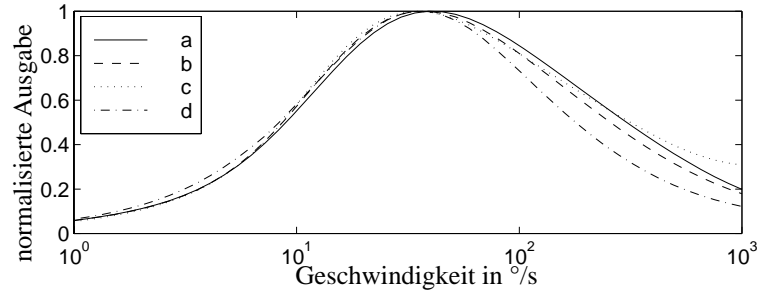


Abbildung 5: Ausgabe eines Voll-EMDs auf sinusförmige Streifenmuster unterschiedlicher räumlicher Frequenz.  $\Delta\tau$  war 35 ms, der Winkel zwischen beiden Detektoren war  $1,08^\circ$  (aus [DOL00])



(a)



(b)

Abbildung 6: Ausgabe eines Voll-EMDs auf die Bilder in Abbildung 7. In 6(b) die Ausgabe von 6(a) auf gleiches Maximum normalisiert (aus [DOL00])

wäre. *Melissa* sieht mit 10 Bildern pro Sekunde. Da ein EMD pro Seite sehr störepfindlich ist [Iid01], arbeitet der Roboter mit einem Feld von 90 (horizontal) auf 30 (vertikal) Elementarbewegungsdetektoren. Die Winkelauflösung beträgt  $1^\circ$ . Die Zusammenschaltung der zweidimensionalen EMD-Felder erfolgt durch einfaches Aufsummieren ihrer Ausgaben. Diese Ergebnisse stellen dann die vom System wahrgenommenen räumlich-zeitlichen Frequenzen auf den beiden Seiten des Blimps dar. Seien  $H1\_HL(t)$  bzw.  $H1\_HR(t)$  die Ausgabe der Detektorenfelder HL bzw. HR:

$$H1\_HL(t) = \sum_i \sum_j EMD\_HL_{ij}(t)$$

$$H1\_HR(t) = \sum_i \sum_j EMD\_HR_{ij}(t)$$

Für die visuelle Odometrie gilt  $s = \int_t v(t)dt$  und damit hier im diskreten Fall mit der Ausgabe  $VO$  des visuellen Odometers

$$VO = \sum_t H1\_HL(t) + H1\_HR(t).$$



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 7: Bilder, wie sie in [DOL00] verwendet wurden



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 8: **8(a)**: Der autonom fliegende Roboter *Melissa*; **8(b)**: Seine Gondel; **8(c)**: Das wahrgenommene Panoramabild; **8(d)**: Das log-polar-transformierte Bild, das die EMDs empfangen

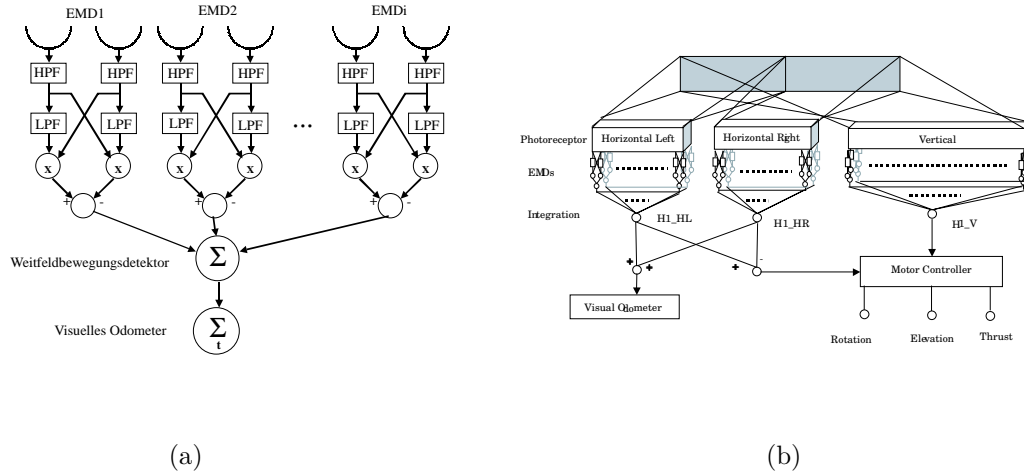


Abbildung 9: **9(a)**: Das visuelle Odometer von Iida [IL00]; **9(b)**: Zusammenbau der EMDs

### 3.2.2 Tests

Iida veröffentlichte ein Experiment in normaler Büroumgebung [Iid00]. Auf drei verschiedenen Routen flog der Blimp jeweils zehn mal mit konstanter Geschwindigkeit und musste selbst für Kurskorrektur durch Ausgleichen der wahrgenommenen Bildgeschwindigkeit und Entfernungsmessung sorgen.

In den Abbildungen 10(a) - 10(c) ist die vom visuellen Odometer gemessene Strecke nach der Zeit abgebildet. Zumindest bei den Experimenten 0 und 1 lässt sich erkennen, dass diese Methode einigermaßen gut wiederholbare Ergebnisse zeigt. In Abbildung 10(d) wird erkennbar wie gut oder schlecht diese Art der Odometrie hier arbeitet. Da die Ergebnisse für die einzelnen Experimente jeweils getrennt voneinander liegen kann daraus geschlossen werden, dass das Odometer tatsächlich sehr stark von der Umgebung abhängt.

## 4 Zusammenfassung

Dass die wahrgenommene Bildgeschwindigkeit bei der Odometrie von Fluginsekten die Hauptrolle spielt, scheint, bis auf die Anomalie bei den Experimenten mit Gegen- bzw. Rückenwind, klar zu sein. Wie allerdings Insekten wirklich eine hochfrequente Bewegung mit vielen Impulsen pro Zeiteinheit von schneller Bewegung unterscheiden ist noch unklar. Es wäre theoretisch mit EMDs möglich, einige Anzeichen zeigen in diese Richtung, Ansätze zu einer Theorie dazu existieren auch. Diese erfolgreich in die Technik umzusetzen steht allerdings noch aus.

Iidas Arbeit hat gezeigt, dass visuelle Odometrie durch Elementarbewegungsdetektoren prinzipiell auch in Robotern anwendbar ist, jedoch noch starken Verfeinerungen bedarf um auch in unbekannter variierender Umgebung einsetzbar zu sein, da sie momentan nur

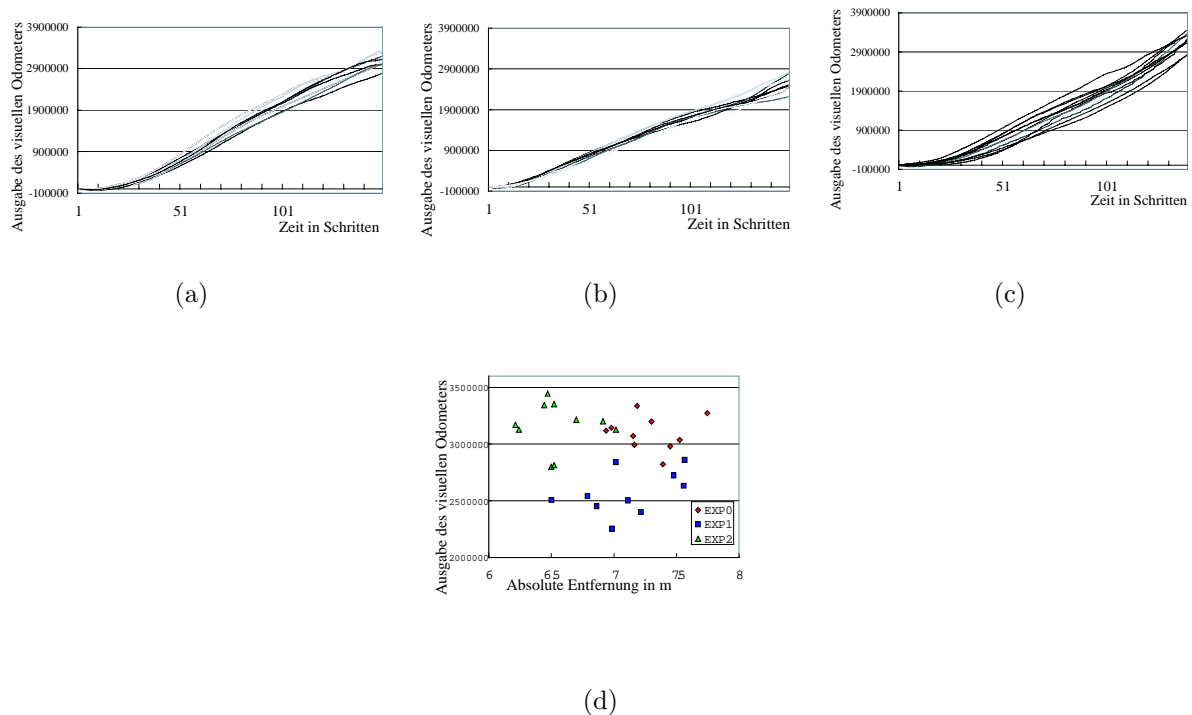


Abbildung 10: **10(a)** - **10(c)** Die Ausgabe des visuellen Odometers bei den jeweils 10 Läufen in den drei Versuchsanordnungen 0-2 nach der Zeit. **10(d)**: Ausgabe des Odometers aufgetragen nach dem tatsächlich zurückgelegten Weg. (aus [Iid00])

relativ zur gleichen Strecke brauchbare Entfernungsangaben machen kann. Als Mittel zur Kursstabilisierung lassen sich EMDs ebenfalls verwenden bzw. sind im Zusammenhang zu visueller Odometrie nötig, da z.B. die Flughöhe an einer Stelle bei jedem Flug die gleiche sein sollte und dies von EMDs geleistet wird.

## Literatur

- [DOL00] DROR, RON O., DAVID C. O'CARROLL und SIMON B LAUGHLIN: *The role of natural image statistics in biological motion estimation*. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Biologically Motivated Computer Vision*, Seoul, Korea, May 2000. IEEE Computer Society.
- [D'Z03] D'ZMURA, MICHAEL: *Psychology 9B Lecture 7 Notes*. Internet, 1995-2003. <http://www.cvr.uci.edu/psych9b/lectures/lec7notes.html>.
- [EB95] ESCH, HARALD. E. und JOHN. E. BURNS: *Honeybees use optic flow to measure the distance of a food source*. *Naturwissenschaften*, 82:38–40, 1995.

- [EB96] ESCH, HARALD E. und JOHN E. BURNS: *Distance Estimation by Foraging Honeybees*. Journal of Experimental Biology, 199:155–162, 1996.
- [EBR89] EGELHAAF, M., A. BORST und WERNER REICHARDT: *Computational structure of a biological motion-detection system as revealed by local detector analysis in the fly's nervous system*. Journal of the Optical Society of America, 6:1070–1087, 1989.
- [GE90] GOLLER, F. und HARALD. E. ESCH: *Waggle dances of honeybees: is distance measured through energy expenditure on outward flight?* Naturwissenschaften, 77:594–595, 1990. Zitiert nach [EB96].
- [HW52] HERAND, H. und L. WANKE: *Beobachtungen über die Entfernungsmeldung der Sammelbienen*. Zeitschrift für vergleichende Physiologie, 34:383–393, 1952. Zitiert nach [EB96].
- [Iid00] IIDA, FUMIYA: *Biologically Inspired Visual Odometer for Navigation of a Flying Robot*. In: *Proceedings of Intelligent Autonomous Systems 7*, Seiten 142–149, 2000.
- [Iid01] IIDA, FUMIYA: *Goal-Directed Navigation of an Autonomous Flying Robot Using Biologically Inspired Cheap Vision*. In: *Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics)*, April 2001.
- [IL00] IIDA, FUMIYA und DIMITRIOS LAMBRINOS: *Navigation in an autonomous flying robot using a biologically inspired visual odometer*. In: *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems III, Photonics East, Proceedings of SPIE*, Band 4196, Seiten 86–97, 2000.
- [Kal96] KALBACHER, MARTIN: *Ultraschallgestützte Navigation und Wegplanung in bekannter Umgebung*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, IPVR, 1996.
- [Mas02] MASON, ANDREW: *Slides for: Invertebrate Neurobiology, week 7*, 2002. [http://www.scar.utoronto.ca/~amason/courses/coursepage/week7/lecture7\\_2003\\_4.pdf](http://www.scar.utoronto.ca/~amason/courses/coursepage/week7/lecture7_2003_4.pdf), Stand Juni 2003.
- [Men01] MENZEL, RANDOLF: *Was denken Bienen, wenn sie tanzen?* Internet, 2001. <http://www.elfenbeinturm.net/archiv/2001/ohne.html>, Stand Juni 2003.
- [Rei69] REICHARDT, WERNER: *Processing of Optical Data by Organisms and Machines*, Kapitel Movement Perception in Insects, Seiten 465–493. Academic Press, New York, 1969. Zitiert nach [Iid01].
- [SZAT00] SRINIVASAN, MANDYAM V., SHAOWU W. ZHANG, MONIKA ALTWEIN und JÜRGEN TRAUTZ: *Honeybee Navigation: Nature and Calibration of the “Odometer”*. Science, 287:851–853, February 2000.

- [SZB97] SRINIVASAN, MANDYAM V., SHAOWU. W. ZHANG und N. J. BIDWELL: *Visually Mediated Odometry in Honeybees*. Journal of Experimental Biology, 200:2513–2522, 1997.
- [vF67] FRISCH, KARL VON: *The Dance Language and Orientation of Bees*, Seite 566ff. Cambridge MA: Harvard University Press, 1967. Zitiert nach [EB96].
- [ZSE99] ZANKER, J.M., MANDYAM V. SRINIVASAN und M. EGELHAAF: *Speed tuning in elementary motion detectors of the correlation type*. Biological Cybernetics, 80:109–116, 1999.