

INAUGURAL - DISSERTATION

zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich-Mathematischen
Gesamtfakultät
der
Ruprechts-Karls-Universität
Heidelberg

vorgelegt von
Dipl. Phys. Ralf Küsters
aus Böblingen

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juli 2004

Simultane Tiefen- und Flussbestimmung pflanzlicher Oberflächen

Gutachter: Prof. Dr. Bernd Jähne
Prof. Dr. Josef Bille

Zusammenfassung

Thema der vorliegenden Arbeit ist die stereobasierte 3D-Vermessung deformierbarer Objekte. Speziell wird der räumliche Verlauf sowie die Verformung von pflanzlichen Oberflächen bestimmt. Die Lage im Raum sowie das Bewegungsfeld der beobachteten Objekte werden simultan als Tiefe und optischer Fluss in Multikamera-Bildsequenzen geschätzt. Dies ist durch einen Near-Baseline-Stereoansatz realisiert. Zeitliche Mehrkamerasequenzen werden als 4D-Datensatz interpretiert. Zur Berechnung der Tiefe kann ein lineares Modell aufgestellt werden. Die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (BCCE) wird um Disparitätsterme erweitert. Eine Parameterschätzung mit einem differentiellen lokalen Total-Least-Squares-Verfahren, dem Strukturtensoransatz, liefert simultan Tiefen- und Flussinformation. Eine zusätzliche Erweiterung der BCCE erlaubt die gleichzeitige Schätzung der Divergenz des Flussfeldes und damit der Tiefengeschwindigkeit. Genauigkeitsanalysen auf synthetischen und realen Sequenzen zeigen die für das Strukturtensorverfahren charakteristische hohe Rauschstabilität und Genauigkeit. Als botanische Anwendung wird ein Verfahren zur Messung der lokalen relativen Oberflächenänderung von sich bewegenden, gewölbten Pflanzenorganen aus der Größenänderung von Teilflächen entwickelt. Der zeitliche Verlauf dieser Wachsratenmessungen zeigt einen deutlichen Tagesgang. Eine Beschränkung auf die Auswertung statischer Multikamerasequenzen erlaubt die 3D-Vermessung der Kronendächer von Bäumen als geglättete Einhüllende. Um dies auch bei ausgedehnten Pflanzenbeständen zu ermöglichen, wird ein Verfahren entwickelt, das biangular rotierte 3D-Teilrekonstruktionen fusioniert. Als Anwendung erfolgt eine hochaufgelöste Rekonstruktion des Verlaufs des Regenwaldkronendaches im Biosphere 2 Center, Arizona.

Abstract

The subject of this thesis is the stereo based 3d survey of deformable objects. This includes the calculation of spatial structure and deformations of plant surfaces. The position in space and the movement field are simultaneously estimated as depth and optical flow in multi camera image sequences. This is realized by a near baseline stereo approach. Temporal multi camera sequences are taken as a 4d data set. A linear model is used to calculate depth. The brightness change constraint equation (BCCE) is extended by disparity terms. Parameters are estimated with a local differential total least squares method, the structure tensor approach, simultaneously yielding depth and flow information. An additional extension of the BCCE allows the simultaneous estimation of flow divergence and thus depth motion. The accuracy of this techniques is quantified on synthetic and real sequences. The results show the typical behavior for the structure tensor approach, high noise stability and accuracy. As a botanical application, a method for measuring of local relative area changes of moving curved surfaces is developed. The temporal course of those growth rate measurements shows a clear diurnal rhythm. Limiting the evaluations to those of static multi camera sequences allows the 3d survey of tree canopies as a smoothed envelope. To accommodate this for extended populations, a method is developed which creates a fusion of partial 3d reconstructions. This is applied in the high resolution reconstruction of the rainforest canopy in the Biosphere 2 Center, Arizona.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
I	Theorie	15
2	Lineare Multi-Kameramodelle zur simultanen Tiefen- und Flussbestimmung	17
2.1	Bestimmung des optischen Flusses	18
2.1.1	Die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses	19
2.1.2	Das Strukturtenorverfahren	20
2.1.3	Optischer Fluss mit Helligkeitsänderungen	21
2.2	Stereoerweiterungen des Strukturtenorverfahrens	23
2.2.1	Kombinierte Tiefen- und Flussbestimmung	23
2.2.2	Eine neue Kontinuitätsgleichung in 4D	25
2.2.3	Erweiterung der BCCE auf Divergenzschätzung	26
2.3	Zusammenfassung	28
3	Wachstum verformbarer Oberflächen	29
3.1	Wuchsraten	29
3.1.1	Wuchsrate und Divergenz	30
3.1.2	Wachstum in ein und zwei Dimensionen	31
3.1.3	Grenzen der Divergenzmethode	32
3.2	Wuchsratenberechnung auf verformbaren Gittern	34
3.2.1	Berechnung der Tiefengeschwindigkeit	34
3.2.2	Transformation in Weltkoordinaten	35
3.2.3	Teilflächenexpansion eines Gitters	36
3.3	Zusammenfassung	37
4	Rekonstruktion ausgedehnter Oberflächen	39
4.1	Fusion rotierter Teilrekonstruktionen	39

4.1.1	Die Geometrie rotierter Raumwinkelbereiche	40
4.1.2	Berechnung von Raumwinkelüberlappungen	43
4.2	Koordinatentransformationen	45
4.2.1	Lokale kartesische Koordinaten	46
4.2.2	Lokale Kugelkoordinaten	46
4.2.3	Globale Kugelkoordinaten	47
4.2.4	Globale kartesische Koordinaten	47
4.3	Zusammenfassung	48
5	Bekannte Verfahren	49
5.1	Methoden zur Wachstumsanalyse	49
5.1.1	Manuelle Wachstumsuntersuchungen	50
5.1.2	Wachstumsuntersuchungen mit digitaler Bildverarbeitung	51
5.2	Verfahren zur Kronendachvermessung	53
5.2.1	Manuelle Kronendachuntersuchungen	54
5.2.2	Kronendachvermessung mit Bildverarbeitungsmethoden	54
5.3	Zusammenfassung	55
II	Experimente	57
6	Experimentelle Aufbauten	59
6.1	Aufbau zur Bestimmung von Wuchsraten	59
6.1.1	Geräte und Aufbau	59
6.1.2	Bildaufnahme und Auswertung	60
6.1.3	Kalibrierung	61
6.2	Aufbau zur Kronendachrekonstruktion	61
6.2.1	Geräte und Aufbau	61
6.2.2	Bildaufnahme und Auswertung	63
6.2.3	Kalibrierung	65
6.3	Zusammenfassung	65
7	Genauigkeitsabschätzungen	67
7.1	Genauigkeit der neuen Strukturtensoverfahren	67
7.1.1	Genauigkeit des Tiefen- und Flussverfahrens	67
7.1.2	Genauigkeiten bei simultaner Divergenzschätzung	75
7.2	Genauigkeiten der Wuchsratenberechnungen	78
7.2.1	Genauigkeit auf echten Sequenzen	78

7.2.2	Genauigkeit auf synthetischen Sequenzen	78
7.3	Zusammenfassung	81
8	Experimente an Pflanzen	85
8.1	3D-Rekonstruktionen von Pflanzenorganen	85
8.1.1	Oberflächenstruktur und 3D-Rekonstruktionen	85
8.1.2	Objekte mit kontinuierlicher Oberfläche	86
8.1.3	Nichtkontinuierliche Oberflächen	91
8.2	Wachstum von Pflanzenorganen	93
8.2.1	Wuchsratenmessungen an Kakteen	93
8.2.2	Wuchsratenmessungen an Feigen	98
8.3	Kronendachrekonstruktion	101
8.3.1	Bildaufnahme	104
8.3.2	Ausgangsbilder und Teilrekonstruktionen	104
8.3.3	Rohdaten und Auflösungsreduzierung	105
8.4	Zusammenfassung	106
9	Zusammenfassung und Ausblick	111
A	Notation	115
B	Aufnahme der Würfelsequenzen	117
B.1	Messaufbau	117
B.2	Die Sequenzen	119
C	Das Sprühmarkerverfahren	121
D	Kalibrierung an Gebäudemerkmalen	123
	Literatur	125

Kapitel 1

Einleitung

Thema dieser Arbeit ist die stereobasierte 3D-Vermessung deformierbarer Objekte. Dabei wird auf einem bestehenden 2D-Verfahren aufgebaut: Der optische Fluss, d.h. die Bewegung der Szene in einer Bildsequenz, wird mit einem differentiellen Verfahren, dem sogenannten Strukturtensoransatz, berechnet [34]¹). Aus diesem Geschwindigkeitsfeld kann die relative Flächenänderung von Pflanzenoberflächen bestimmt werden. Diese Wachsrates ist eine botanisch relevante Messgröße. Das 2D-Verfahren hat eine gravierende Einschränkung: Ändert sich die Entfernung des Objekts zur Kamera, so ändert sich dessen Größe im Bild. Um dieses scheinbare von echtem Wachstum trennen zu können, muss der 3D-Verlauf der Objektoberfläche bekannt sein.

Die Thematik der Kopplung von Tiefeninformation mit optischen Flussverfahren zur Bestimmung von pflanzlichen Wachsrates wurde schon bearbeitet: Aus einem auf Blattoberflächen projizierten Muster kann deren Lage im Raum berechnet werden [79]. Eine für die Praxis genügend stabile Messung von Wachsrates ist mit diesem System aber nicht möglich. Das in der vorliegenden Arbeit beschriebene Verfahren verwendet keine Musterprojektion, sondern einen Stereoansatz zur Gewinnung von Oberflächeninformation [20]: Die Tiefeninformation wird aus den Bildsequenzen mehrerer Kameras bestimmt.

Botanische Motivation

Die Untersuchung von Pflanzenwachstum durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung ist Thema einer mehrjährigen Zusammenarbeit zwischen der Arbeitsgruppe Dynamik pflanzlichen Wachstums des ICG-III innerhalb des Forschungszentrums Jülich (Professor Uli Schurr) und der Gruppe Digitale Bildverarbeitung des Interdisziplinären Zentrums für wissenschaftliches Rechnen an der Universität Heidelberg (Professor Bernd Jähne). Pflanzenwachstum kann über Wachsrates quantifiziert werden. Dabei werden relative Größenänderungen berechnet. Im Rahmen obiger Kooperation wurde eine Methode zur Messung von Flächenwachsrates entwickelt [72].

Wächst eine Pflanze, so entfernen sich die Strukturen auf ihrer Oberfläche voneinander. Aus der Verschiebung von Oberflächenstrukturen in Zeitrastersequenzen von Blättern und Wurzeln kann die

¹Hier ist jeweils nur die für diese Arbeit wichtigste Publikation genannt. Weitere Literaturangaben finden sich in den einzelnen Kapiteln.

lokale Flächenänderung berechnet werden. Die Bestimmung des optischen Flusses geschieht über den Strukturtensoransatz, ein lokales Total-Least-Squares-Minimierungsverfahren. Das Verfahren ist differentiell, d.h. es beruht auf der Schätzung von Parametern einer Differentialgleichung, die die zeitliche Entwicklung der Grauwerte in den Bildsequenzen beschreibt. Die Berechnung von Wuchsraten mit diesem Verfahren setzt voraus, dass die Oberfläche des Beobachtungsobjekts in fester Entfernung zur Kamera liegt: Tiefenänderungen des Objekts ändern dessen Größe im Bild und verfälschen so die berechnete Wuchsrate. Das macht eine Fixierung der aufgenommenen Blätter notwendig, was botanisch mehrere Nachteile mit sich bringt: Natürliche, gewölbte Blattgeometrien bleiben unzugänglich. Außerdem ruft der durch die Fixierung bedingte Tensionsstress Reaktionen auf biochemischer Ebene hervor, die sich von denen des nichtfixierten Wachstums unterscheiden.

Entwicklung neuer Bildverarbeitungsmethoden

Die Unterscheidung zwischen echtem Wachstum und bewegungsbedingten Größenänderungen im Bild kann über die Einbeziehung von Tiefeninformation erfolgen. Weiß man, wie weit Objekt und Kamera voneinander entfernt sind, so können diese Effekte getrennt werden. Bei der Gewinnung solcher 3D-Oberflächeninformation wird zwischen aktiven und passiven Verfahren unterschieden: Aktive Verfahren wie Laserscanner oder die schon erwähnte Projektion von charakteristischen Mustern werten die Reflektion eines Signals aus [56]. Die verwendete Gewinnung von Stereoinformation aus unterschiedlichen Kamerapositionen ist ein passives Verfahren, wobei die Textur der Oberflächen die Tiefeninformation liefert.

Die vorliegende Doktorarbeit stellt eine Erweiterung des oben erwähnten Strukturtensoransatzes vor: Bei Annahme einer idealen Lochkamera führen wiederholte kleine Verschiebungen der Kamera, entlang einer Achse parallel zur Bildebene, zu Verschiebungen der Szene in den Bildern. Zeitliche Mehrkamerasequenzen, die von gering verschobenen Positionen aufgenommen sind, werden hier als 4D-Datensatz interpretiert. Die Kameraposition wird dabei als neue Dimension behandelt. Daraus kann die Tiefe und das Geschwindigkeitsfeld der beobachteten Oberflächen bestimmt werden.

Anwendung der neuen Verfahren

Die Durchführung der Experimente geschah am Biosphere 2 Center in Oracle, Arizona. Dort wurden Wachstumsmessungen an Kakteen und Feigen durchgeführt.

Das vorgestellte Verfahren kann für spezielle Anwendungen auch auf die statische 3D-Rekonstruktion von nichtkontinuierlichen Pflanzenoberflächen beschränkt werden. Technischer Aufbau, Genauigkeitsanalysen und Parameteroptimierungen bleiben hierbei ohne Änderung gültig. Unter den botanischen Testobjekten war auch ein Ficus-Busch, sein dichtes Blattwerk konnte als geglättete Einhüllende rekonstruiert werden. Die Vermessung solcher nichtkontinuierlicher Oberflächen ist mit aktiven Sensoren schwierig. Stereoverfahren mit großem Kameraabstand können korrespondierende Strukturen in Bildpaaren schlecht zuordnen, da diese bei zu unterschiedlichen Perspektiven nicht mehr eindeutig zu identifizieren sind. Der verwendete Ansatz benötigt verzerrungsarme Objektive, deren Öffnungswinkel sind allerdings klein. Ausgedehnte Oberflächen können aus kleineren Entfernungen nur teilweise erfasst werden. Diese Arbeit stellt ein Verfahren vor, das solche Teilrekonstruktionen zu

einer Gesamtoberfläche zusammensetzt. Mit dieser Methode wurde der Verlauf des Kronendaches im Regenwald des Biosphere 2 Centers rekonstruiert.

Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in einen Theorie- und einen Experimententeil aufgeteilt. Die Kapitel 2 bis 5 beschreiben die Entwicklung der neuen Bildverarbeitungsmethoden, die notwendigen Hintergründe werden kurz erläutert und die neuen Verfahren werden in bestehende eingeordnet. Kapitel 6 bis 9 beschäftigen sich mit der experimentellen Umsetzung der entwickelten Verfahren.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über Verfahren zur Bestimmung von Bewegung in Bildsequenzen; speziell wird das Strukturtenorverfahren erläutert. Ausgehend von der herkömmlichen Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses werden zwei Erweiterungen entwickelt. Eine erlaubt die simultane Bestimmung von Tiefe und optischem Fluss in Mehrkamerasequenzen, die andere bestimmt zusätzlich simultan die Tiefenänderung in den Sequenzen.

Kapitel 3 erläutert, wie Größenänderungen von Oberflächen über Wachsraten quantifiziert werden können. Dann werden die Grenzen der Berechnung von Wachsraten aus Einkamerasequenzen bestimmt und ein alternatives Verfahren entwickelt, bei dem die Wachsraten aus der Größenänderung von Teiloberflächen bestimmt wird.

Im 4. Kapitel wird beschrieben, wie ausgedehnte 3D-Oberflächen aus der Fusion von rotierten Teiloberflächen zusammengesetzt werden können. Nach einer Reihe von Koordinatentransformationen liegen die Oberflächenpositionen schließlich in kartesischen Koordinaten relativ zur Kameraposition vor.

Kapitel 5 stellt eine Auswahl bekannter Messverfahren zur Berechnung von Wachsraten auf pflanzlichen Oberflächen bzw. der Vermessung von Kronendächern vor.

Der Experimententeil der Arbeit beginnt in Kapitel 6 mit einer Beschreibung der verwendeten Aufbauten. Die Aufnahme der Bildsequenzen wird erläutert und der Aufbau der Auswertesoftware beschrieben. Schließlich werden noch die notwendigen Kalibrierungen dargestellt.

Im 7. Kapitel werden die Messungenauigkeiten der entwickelten Verfahren abgeschätzt. Dies geschieht anhand von synthetischen und realen Sequenzen.

Kapitel 8 schildert die durchgeführten Experimente und zeigt deren Ergebnisse. Zuerst wird eine Reihe von botanischen Beispielobjekten vermessen. Es folgen die Darstellung der Ergebnisse von Wachsratenmessungen auf verschiedenen Pflanzenorganen und die Rekonstruktion eines ausgedehnten Kronendaches durch Fusion von Teilrekonstruktionen.

Eine Zusammenfassung der theoretischen und experimentellen Ergebnisse wird in Kapitel 9 gegeben. Es folgt ein Ausblick mit denkbaren Weiterentwicklungen der entwickelten Verfahren.

Teil I

Theorie

Kapitel 2

Lineare Multi-Kameramodelle zur simultanen Tiefen- und Flussbestimmung

Die quantitative Analyse von Verschiebungsvektorfeldern ist für einen weiten Bereich wissenschaftlicher und technischer Anwendungen von Interesse. Beispiele sind die Untersuchung von Strömungen in der Hydrodynamik oder die Entwicklung von Zielsuchsystemen in der Militärtechnik. Die Benutzung von Bildverarbeitungsmethoden ist dabei weit verbreitet. Durch die Fortschritte der Computertechnik wurde die schnelle Auswertung von Bildsequenzen möglich. Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung von zwei neuen Verfahren zur Bewegungsschätzung: Erweiterungen eines klassischen gradientenbasierten lokalen Minimierungsverfahrens, des so genannten Strukturtensorverfahrens, erlauben die Bestimmung von dreidimensionalen Oberflächen und deren Geschwindigkeitsfeldern. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird eines der Verfahren zur Untersuchung von pflanzlichen Oberflächen eingesetzt. Dies umfasst zum einen die Messung der relativen Wachsraten von Pflanzenorganen, zum anderen die Rekonstruktion ausgedehnter Oberflächen.

Zuerst wird ein Überblick über verschiedene Ansätze zur Bewegungsschätzung gegeben. Dann wird eine klassische Methode zur optischen Flussbestimmung, das Strukturtensorverfahren (STV), ausführlicher beschrieben: In von einer Kamera aufgenommenen Bildsequenzen wird durch ein lokales Minimierungsverfahren das Verschiebungsvektorfeld von Aufnahme zu Aufnahme berechnet [40][34][5][35][39]. Der Strukturtensoransatz hat sich für einen weiten Bereich von Anwendungen bewährt [41][44][32]. Es folgt die Vorstellung von zwei neuen Erweiterungen dieses Ansatzes: Durch einen linearisierten Stereoansatz (d.h. der Auswertung von Aufnahmen nah benachbarter Kamerapositionen) kann neben dem optischen Fluss simultan die Tiefe der Objektoberflächen bzw. die Tiefe und die Bewegung in Kamerarichtung bestimmt werden.

Trotz der umfangreichen Literatur zur Bestimmung des optischen Flusses wurden wenig direkte Erweiterungen entwickelt. Es existieren Erweiterungen zur Bestimmung von affiner Bewegung [19][22], Fluss in Textur- und Tiefenkarten [80], physikalisch motivierten Helligkeitsunterschieden [33][14][30], von Variationsansätzen [95][94] und robusten Bestimmungsverfahren [24][7]. Regularisierungen [81][46], spezielle Filter [71][42][23][18] und gekoppelte Entrauschungsverfahren [82] wurden entwickelt. Es gibt Systeme für Bewegungs- und Stereoanalysen [84][90][89][12]. Die Verbindung zum erweiterten Strukturtensoransatz wurde noch nicht genutzt.

2.1 Bestimmung des optischen Flusses

Bei Bewegungsbestimmungen aus Bildsequenzen stellt sich ein fundamentales Problem: Der prinzipielle Unterschied zwischen der scheinbaren Bewegung im Bild und der tatsächlichen physikalischen Bewegung der beobachteten Objekte. Bei allen Arten der Bewegungsschätzung wird nur die scheinbare Bewegung im Bild, der *optische Fluss*, bestimmt [37]. Für die quantitative Analyse der gesehenen Szene müssen weitere Annahmen über Helligkeitsschwankungen, Objekteigenschaften oder die Beziehung zwischen der echten 3D-Bewegung und dem 2D-Bildsensor gemacht werden.

Methoden zur Bewegungsschätzung in Bildsequenzen können in drei Kategorien eingeordnet werden:

- *Korrelationsbasierte Methoden* bestimmen Verschiebungen durch den Vergleich zweier aufeinander folgender Bilder [4][25][51]. Dies geschieht nach folgendem Grundprinzip: Im ersten Bild wird ein Ausschnitt oder eine lokale Nachbarschaft definiert, dann wird die Position im zweiten Bild gesucht, die die beste Übereinstimmung der beiden Bildbereiche liefert. Nachteile von Korrelationsmethoden sind der hohe numerische Aufwand, Vorteile sind die Robustheit gegenüber Helligkeitsunterschieden und die Möglichkeit, auch große Verschiebungen zu detektieren.
- *Merkmalsbasierte Methoden* vergleichen nicht die Grauwertverläufe in Bildregionen, sondern arbeiten mit Merkmalen, die in den Originalbildern bestimmt werden [1][97]. Es werden z.B. die Positionen von einzelnen bewegten Teilchen bestimmt und durch die Sequenz verfolgt. Da man den detektierten Teilchen neben ihrer Position noch weitere Attribute wie Größe oder Form zuordnen kann, sind sie gegenüber Grauwertschwankungen stabiler als grauwertbasierte Methoden. Nachteile dieses Ansatzes sind die zum Teil sehr aufwendigen Trackingmethoden, die benutzt werden müssen, um die Teilchenbahnen zu verfolgen.
- *Gradientenbasierte Methoden* basieren auf der Berechnung von Grauwertableitungen im Bild. Diese können erster [21][38] oder zweiter Ordnung sein [58][87]. Im ersten Fall wird meist angenommen, dass sich die Helligkeit der Szenerie im Bild zeitlich nicht ändert. Dann werden Helligkeitsänderungen nur durch Objektbewegungen hervorgerufen. Dieses Verhalten wird als "Erhaltung des optischen Flusses" bezeichnet. Techniken zur Bestimmung des optischen Flusses können auch sehr kleine Verschiebungen bestimmen, bis in einen Bereich von 10^{-2} Pixel/Frame. Die maximal bestimmbare Verschiebung wird durch das Abtasttheorem vorgegeben. Im allgemeinen Fall von Bildern, die alle räumlichen Frequenzen enthalten, liegt die maximal bestimmbare Verschiebung bei etwa 1 Pixel/Frame.

Bei der Auswertung botanischer Wachstumssequenzen haben sich Methoden zur optischen Flussbestimmung bewährt. Da sich Pflanzen nur langsam bewegen, ist die geringe Reichweite der Methode üblicherweise kein Problem. Außerdem soll das Bewegungsfeld des gesamten Beobachtungsobjektes bestimmt werden, bei ausreichend Grauwertstruktur auf der Oberfläche können gradientenbasierte Methoden solche dichten Verschiebungsvektorfelder bestimmen.

2.1.1 Die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses

Methoden zur Bestimmung des optischen Flusses gehen häufig von einer zeitlichen Konstanz der Helligkeit in den Bildern aus. Mathematisch wird dies in der Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses erfasst (engl: Brightness Change Constraint Equation, BCCE). Es wird davon ausgegangen, dass die Helligkeit eines Punktes in der Szene in einer raum-zeitlichen Nachbarschaft konstant bleibt.

$$g(x(t), y(t), t) = \text{konstant}$$

Bei totaler Ableitung nach der Zeit t folgt daraus

$$\frac{dg}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial t} = 0$$

Dies ist die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (BCCE). Schreibt man nun $u_x = \frac{\partial x}{\partial t}$ bzw. $g_x = \frac{\partial g}{\partial x}$, so lässt sich dies auch schreiben als

$$g_x u_x + g_y u_y + g_t = 0 \quad (2.1)$$

Definiert man einen Datenvektor $\mathbf{d} = (g_x, g_y, g_t)$ und einen Parametervektor $\mathbf{p} = (u_x, u_y, 1)$, so kann (2.1) auch in folgender Form geschrieben werden:

$$\mathbf{d}^T \mathbf{p} = 0 \quad (2.2)$$

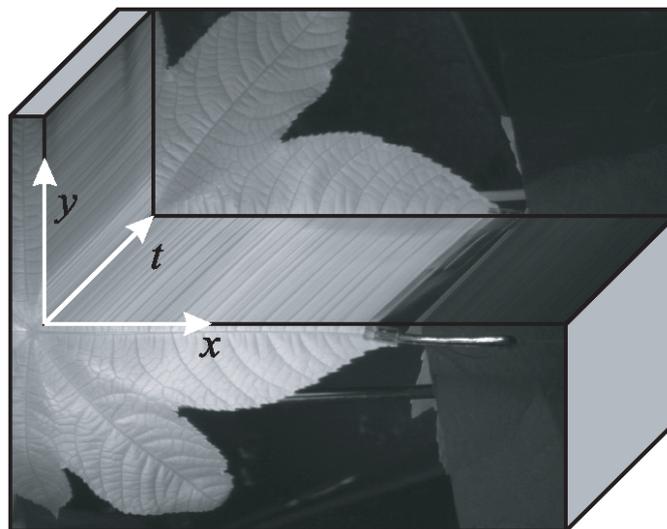


Abbildung 2.1: Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses: Folgt man Grauwertstrukturen zeitlich durch eine Bildsequenz, so bewegen sie sich entlang linearer Strukturen. Bei Annahme von $\frac{dg}{dt} = 0$ kann die Lage dieser Trajektorien bestimmt werden, sie charakterisiert die Bewegung der Strukturen [72].

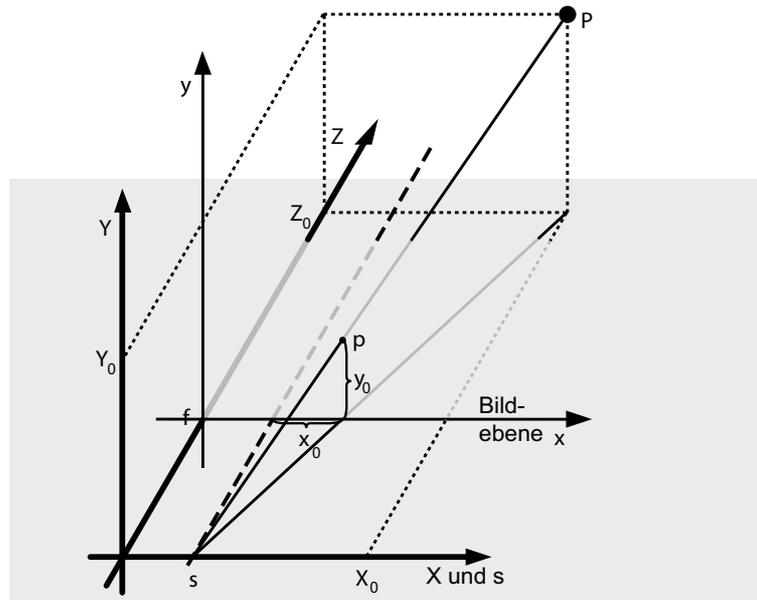


Abbildung 2.2: Projektion einer Weltposition P durch eine Lochkamera. Die Position der Kamera wird durch s gekennzeichnet, die Kamera liegt auf der x -Achse.

2.1.2 Das Strukturtensorverfahren

Die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses lässt sich als Produkt eines Datenvektors \mathbf{d} und eines linearen Parametervektors \mathbf{p} schreiben. Interpretiert man $\mathbf{u} = (u_x, u_y)^T$ als die Verschiebung der Projektion p einer Weltposition P (Abbildung 2.2), so besagt (2.1) die zeitliche Konstanz des Grauwertes von p :

(2.2) ist eine Gleichung für zwei Parameter und damit unterbestimmt. Da diese Gleichung für alle Pixel gilt, erscheint eine Glattheitsannahme als sinnvoll: Innerhalb einer (kleinen) Nachbarschaft Ω der Pixel i werden alle Gleichung durch einen annäherungsweise gleichen Satz von Parametern \mathbf{p} gelöst. Dann wird (2.2) zu

$$\mathbf{d}^T \mathbf{p} = e_i \quad \text{für alle Pixel } i \text{ in } \Omega \quad (2.3)$$

mit dem Residuum oder Fehlerterm e_i , der durch den Lösungsvektor $\tilde{\mathbf{p}}$ minimiert wird.

Es liege ausreichend Grauwertvariation in den Daten vor. Dann spannt der Datenvektor \mathbf{d}_i den gesamten Raum auf. Üblicherweise wird dies in der Bestimmung des optischen Flusses der *full flow case* genannt, es können alle Parameter bestimmt werden. Reicht die Struktur im Bild nicht aus, so können nicht alle Parameter bestimmt werden. In diesem Fall spricht man vom *normal flow case*.

In Matrixschreibweise $\mathbf{D}_{ij} = (\mathbf{d}_i)_j$ lässt sich (2.3) als $\mathbf{D}\mathbf{p} = \mathbf{e}$ schreiben. Die Minimierung von \mathbf{e} in gewichteter L_2 -Norm führt zu

$$\|\mathbf{e}\|_2 = \|\mathbf{D}\mathbf{p}\|_2 = \mathbf{p}^T \mathbf{D}^T \mathbf{W} \mathbf{D} \mathbf{p} =: \mathbf{p}^T \mathbf{J} \mathbf{p} \stackrel{!}{=} \min, \quad (2.4)$$

wobei \mathbf{W} eine diagonale Wichtungsmatrix der \mathbf{L}_2 -Norm ist. Diese multipliziert jede Gleichung i in (2.3) mit einem Wichtungsfaktor w_i . \mathbf{J} ist der Strukturtensor. Üblicherweise wird \mathbf{e} über Einführung der Annahme $|\tilde{\mathbf{p}}| = 1$ minimiert. In diesem Fall wird die Lösung $\tilde{\mathbf{p}}$, die \mathbf{e} minimiert, durch den Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert von \mathbf{J} gegeben. Dies ist der Nullraum von \mathbf{J} falls der Fehler Null ist. Vergleicht man den Parametervektor $\mathbf{p} = (u_x, u_y, 1)$ mit der Annahme $|\tilde{\mathbf{p}}| = 1$, so ergibt sich

$$\frac{dx}{dt} = u_x = \frac{\tilde{\mathbf{p}}_1}{\tilde{\mathbf{p}}_3} \quad \text{und} \quad \frac{dy}{dt} = u_y = \frac{\tilde{\mathbf{p}}_2}{\tilde{\mathbf{p}}_3} \quad (2.5)$$

Die Eigenwerte von \mathbf{J} sind die mittleren quadratischen Richtungsableitungen des Grauwertes in Richtung der korrespondierenden Eigenvektoren. D.h. $\tilde{\mathbf{p}}$ zeigt entlang der Trajektorie in der Abbildung des sich bewegenden Punktes P (Abbildung 2.1). Falls die Annahme konstanter Helligkeit exakt gilt (und genug Struktur im Bild ist), so ist $\tilde{\mathbf{p}}$ der Nullraum von \mathbf{J} . Die Bestimmung der Parameter geschieht also in zwei Schritten: Zuerst ergibt eine Eigenwertanalyse von \mathbf{J} den Parametervektor $\tilde{\mathbf{p}} \propto (dx, dy, dt)^T$, dabei werden $|\tilde{\mathbf{p}}| = 1$ und (2.4) benutzt. Dann werden die Parameter des Modells bestimmt, dies geschieht über $\tilde{\mathbf{p}}$ (2.5).

2.1.3 Optischer Fluss mit Helligkeitsänderungen

In der Herleitung der Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (2.3) wurde angenommen, dass alle Helligkeitsänderungen im Bild von den Objektbewegungen herrühren. Dass diese Annahme in manchen Fällen nicht gerechtfertigt ist, illustriert Abbildung 2.3: Dargestellt ist die Bewegung einer Gaußglocke, zum einen mit einem zusätzlichen exponentiellen Zerfall, zum anderen mit einer überlagerten Diffusion. In beiden Fällen liefert die Schätzung mit der BCCE (2.3) falsche Ergebnisse. Anscheinend müssen in solchen Fällen der BCCE andere Helligkeitsmodelle zugrunde gelegt werden, die Annahme konstanter Grauwerte gilt hier nicht.

Die Helligkeit entlang der Trajektorien, deren Richtung bestimmt wird, muss also variieren können. Die BCCE nimmt durch die Annahme solcher Helligkeitsänderungen folgende Form an:

$$g_x u_x + g_y u_y + g_t = f(g, t, \mathbf{a}) \quad (2.6)$$

Die Funktion f charakterisiert zusätzliche Grauwertänderungen, diese können vom Grauwert g selbst, der Zeit t oder einem Satz von Modellparametern \mathbf{a} abhängen. Physikalische Beispiele für solche Funktionen f sind:

- **Quellterme:** Diese verursachen zeitliche Änderungen in der Bildsequenz, abhängig von der Quellstärke q .

$$f(g, t, \mathbf{a}) = q \quad \Rightarrow \quad \mathbf{d} = (g_x, g_y, 1, g_t) \quad \text{und} \quad \mathbf{p} = (u_x, u_y, -q, 1) \quad (2.7)$$

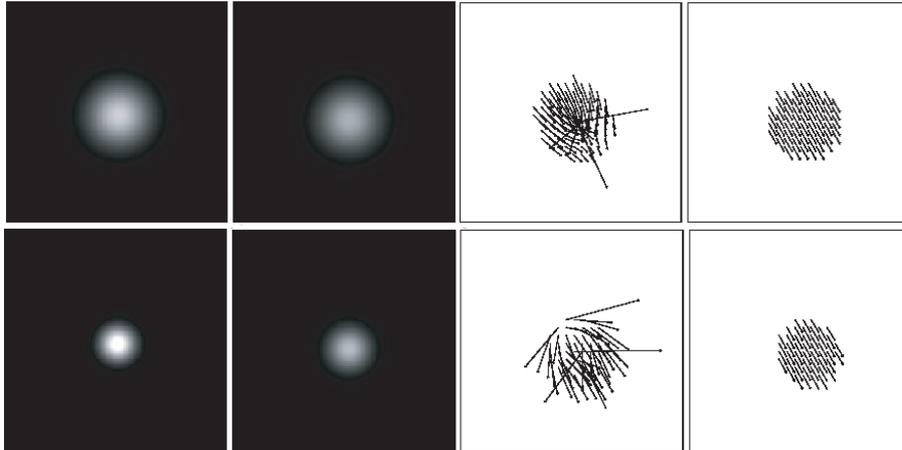


Abbildung 2.3: Bildsequenzen mit zusätzlichen Helligkeitsänderungen [79]: (**oben**) Bewegte Gaussglocke mit exponentiellem Zerfall. Dargestellt sind zwei Originalbilder zu Beginn und Ende der Sequenz sowie das geschätzte Bewegungsfeld ohne und mit erweitertem Helligkeitsmodell. (**unten**) Bewegte Gaussglocke mit Diffusion. Dargestellt sind zwei Originalbilder zu Beginn und Ende der Sequenz sowie das geschätzte Bewegungsfeld ohne und mit erweitertem Helligkeitsmodell.

Quellterme tauchen z.B. in Infrarotsequenzen auf, falls Objekte erhitzt bzw. gekühlt werden oder falls sich die Beleuchtung global ändert.

- **Relaxationsprozesse:** Relaxationen rufen ebenfalls zeitliche Änderungen erster Ordnung hervor. Die Änderung ist proportional zur der Relaxationskonstanten κ und zum Grauwert g .

$$f(g, t, \mathbf{a}) = -\kappa g \quad \Rightarrow \quad \mathbf{d} = (g_x, g_y, g, g_t) \quad \text{und} \quad \mathbf{p} = (u_x, u_y, \kappa, 1) \quad (2.8)$$

Beispiele für Relaxationen sind Zerfallsprozesse in fluoreszierenden Materialien.

- **Diffusionsprozesse:** Werden Transportprozesse in Bildsequenzen erfasst, so finden neben Verschiebungen meist auch Diffusionen statt. Laut Ficks zweitem Gesetz ist dies ein Prozess zweiter Ordnung mit einem Diffusionskoeffizient D , der die Tendenz eines Objekts beschreibt, sich durch den gegebenen Prozess auszubreiten.

$$f(g, t, \mathbf{a}) = D\Delta g \quad \Rightarrow \quad \mathbf{d} = (g_x, g_y, \Delta g, g_t) \quad \text{und} \quad \mathbf{p} = (u_x, u_y, -D, 1) \quad (2.9)$$

Diffusion findet zum Beispiel bei der Mischung zweier unterschiedlich temperierter Flüssigkeiten statt.

Falls der beobachtete physikalische Prozess dem Helligkeitsmodell entspricht, können die Bewegungsfelder korrekt bestimmt werden (Abbildung 2.3). Neben den Bewegungsfeldern werden durch diese Ansätze auch die Modellparameter \mathbf{a} bestimmt.

2.2 Stereoerweiterungen des Strukturtensorverfahrens

Das Strukturtensorverfahren interpretiert die von einer einzelnen Kamera aufgenommene Bildsequenz als Daten in einem dreidimensionalen x - y - t -Raum. Die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (BCCE) definiert ein lineares Modell für die Änderungen des Grauwertes. Als Ergebnis der Rechnungen erhält man das xy -Bewegungsfeld des beobachteten Objekts.

Der gleiche Algorithmus kann benutzt werden, um die Tiefe eines ruhenden Objekts zu bestimmen (“structure from camera motion”) [50]. Die Kamera bewege sich linear entlang der x -Achse, ihre Position sei durch den Parameter s gekennzeichnet (Abbildung 2.2). Dann kann die aufgenommene Bildsequenz als Volumendatensatz im x - y - s -Raum interpretiert werden. Dieselben Aufnahmen können mit einem Aufbau aus mehreren Kameras zu einem Zeitpunkt aufgenommen werden, dies ermöglicht die Auswertung von bewegten Szenen.

Die Grundidee für das im Folgenden vorgestellte Bestimmungsverfahren ist die Interpretation der Kameraposition s von zwei oder mehr Kameras als neuer Dimension. Bei eindimensionaler Anordnung der Kameras können die Bildsequenzen als vierdimensionales Volumen im x - y - s - t -Raum betrachtet werden. Wird ein 2D-Kameragitter benutzt [59], so erhält man ein 5D-Volumen in einem x - y - s_x - s_y - t -Raum. Diese Arbeit beschränkt sich auf den 4D-Raum. In diesem wird eine neue BCCE entwickelt. Dabei werden ein Bewegungs-, ein Kamera- und ein Helligkeitsmodell benutzt. Der 2D-Nullraum des korrespondierenden Strukturensors liefert simultan ein Bewegungsfeld und die Disparität.

2.2.1 Kombinierte Tiefen- und Flussbestimmung

Die Grundidee für das im Folgenden vorgestellte Bestimmungsverfahren ist die Interpretation der Kameraposition s von zwei oder mehr Kameras als neuer Dimension. Bei eindimensionaler Anordnung der Kameras können die Bildsequenzen als vierdimensionales Volumen im x - y - s - t -Raum betrachtet werden. Wird ein 2D-Kameragitter benutzt [59], so erhält man ein 5D-Volumen in einem x - y - s_x - s_y - t -Raum. Diese Arbeit beschränkt sich auf den 4D-Raum. In diesem wird eine neue BCCE entwickelt, dabei werden ein Bewegungs-, ein Kamera- und ein Helligkeitsmodell benutzt. Der 2D-Nullraum des korrespondierenden Strukturensors liefert simultan ein Bewegungsfeld und die Disparität.

In diesem Abschnitt wird die Grundidee des neuen Verfahrens anschaulich dargestellt. Für einen Aufbau mit üblichen Kameras ist der sich ergebende Raum von Daten vierdimensional. Deshalb wird im Folgenden nur eine räumliche Dimension x benutzt (entsprechen Kameras die nur eine Bildzeile aufnehmen). Der Datenraum ist dann dreidimensional und kann anschaulich dargestellt werden.

Abbildung 2.4 zeigt links oben das x - t -Diagramm eines sich bewegenden Punktes. Der Vektor \mathbf{p}_t zeigt entlang der Trajektorie dieses Punktes, es gilt $\mathbf{p}_t \propto (dx, dt)^T$. Die BCCE zur Bewegungsschätzung im Fall von Zeilenkamerassequenzen $g(x, t)$ lautet

$$\frac{dg(x, t)}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial t} = 0 \quad (2.10)$$

dabei ist g der Grauwert, x die räumliche Koordinate und t die Zeit. Mit einem linearen Bewegungsmodell der Form $x(t - t_0) = x_0 + u_x(t - t_0)$ ergibt sich $dx/dt = u_x = \mathbf{p}_{t1}/\mathbf{p}_{t2}$.

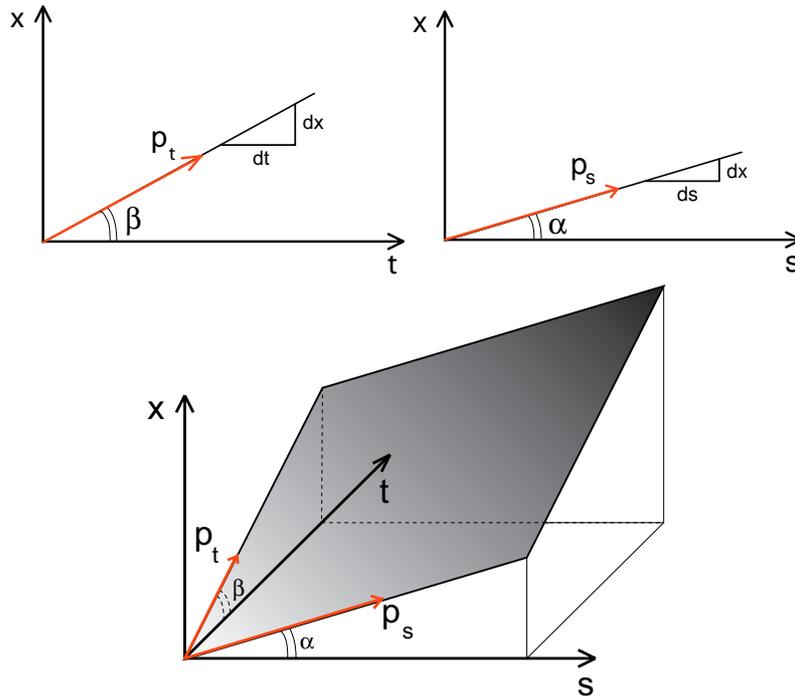


Abbildung 2.4: Trajektorien im (oben) x - t -Raum und x - s -Raum. (unten) Die Kombination beider, ein 2D-Unterraum im x - s - t -Raum.

Analog kann man einen Vektor \mathbf{p}_s definieren, dieser zeigt entlang der Trajektorie, die man im structure-from-motion Fall für mehrere Kameras bekommt (Abbildung 2.4 oben rechts). Die BCCE zur Bestimmung der Disparität lautet

$$\frac{dg(x, s)}{dt} = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial g}{\partial s} = 0, \quad (2.11)$$

wobei s die Position der Kamera beschreibt. Das Lochkameramodell $x = f(X - s)/Z$ liefert für die Disparität $v_x := dx/ds = -f/Z = \mathbf{p}_{s1}/\mathbf{p}_{s2}$.

Die Kombination der x - t -Bilder aller Kamerapositionen s zu einem Gesamtvolumen ergibt $g(x, s, t)$. Damit wird das totale Differential dg zu

$$dg(x, s, t) = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial s} ds + \frac{\partial g}{\partial t} dt \quad (2.12)$$

Dieses totale Differential wird für die simultane Bestimmung von Bewegung und Disparität minimiert. Wie in Kapitel 2.1.2 ist das Ergebnis der Schätzung der Nullraum (oder auch Raum der Eigenvektoren zu ausreichend kleinen Eigenwerten) des Strukturtenors \mathbf{J} zu diesem Differential. Der Nullraum kann als 2D-Mannigfaltigkeit im x - s - t -Raum dargestellt werden (Abbildung 2.4 unten), die Helligkeit eines Punktes ändert sich weder in der Zeit noch mit einem Wechsel der Kameraposition. Der Schnitt dieses 2D-Unterraumes mit der x - t -Ebene ist eine Linie, diese kann durch einen Vektor \mathbf{p}_t repräsentiert

werden. Die Geschwindigkeit u_x ist dann $u_x = \mathbf{p}_{t1}/\mathbf{p}_{t3}$. Der Schnitt des 2D-Unterraumes mit der x-s-Ebene ist ebenfalls eine Linie, die durch den Vektor \mathbf{p}_s beschrieben werden kann. Er liefert die Disparität v_x über $v_x = \mathbf{p}_{s1}/\mathbf{p}_{s2}$.

2.2.2 Eine neue Kontinuitätsgleichung in 4D

Dieser Abschnitt beschreibt die Herleitung der neuen BCCE bei gegebenem Bewegungsmodell, Kameramodell und einem Modell für die Helligkeit. Das totale Differential von $g(x, y, s, t)$, kombiniert mit dem Helligkeitsmodell $dg/dt=0$, liefert

$$dg(x, y, s, t) = \frac{\partial g}{\partial x} dx + \frac{\partial g}{\partial y} dy + \frac{\partial g}{\partial s} ds + \frac{\partial g}{\partial t} dt = 0 \quad (2.13)$$

Als Modell für die Bewegung eines Punktes in Weltkoordinaten (X, Y, Z) gelte

$$(X, Y, Z)(t) = (X_0, Y_0, Z_0) + (U_X, U_Y, 0)t \quad (2.14)$$

mit der Startposition (X_0, Y_0, Z_0) und der Geschwindigkeit $(U_X, U_Y, 0)$. Bewegungen in Z-Richtung werden also vernachlässigt. Die Projektion der Position durch eine Lochkamera an der Position s ergibt für die korrespondierenden xy-Bildkoordinaten $x = f(X - s)/Z$ und $y = fY/Z$ (Abbildung 2.2). Es gilt also

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} (s, t) = \frac{f}{Z_0} \begin{pmatrix} X_0 - s + U_X t \\ Y_0 + U_Y t \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Unter Benutzung von $v_x = -f/Z_0$, $u_x = fU_X/Z_0$ und $u_y = fU_Y/Z_0$ ergeben sich die Differentiale zu $dx = u_x dt + v_x ds$ und $dy = u_y dt$. Diese Ausdrücke für dx und dy in (2.13) eingesetzt ergeben

$$dg(x, y, s, t) = \frac{\partial g}{\partial x} (v_x ds + u_x dt) + \frac{\partial g}{\partial y} u_y dt + \frac{\partial g}{\partial s} ds + \frac{\partial g}{\partial t} dt = 0 \quad (2.16)$$

Dies ist die neue Kontinuitätsgleichung zur simultanen Bestimmung der Disparität v_x und der Bewegung u_x, u_y für Objekte mit konstanter Helligkeit. Die Bestimmung kann über den Strukturtenso \mathbf{J} erfolgen, der Datenvektor ist $\mathbf{d} = (g_x, g_y, g_x, g_t)^T$ und der Parametervektor ist $\mathbf{p} = (v_x ds + u_x dt, u_y dt, ds, dt)^T$. Der Nullraum des Strukturtenso \mathbf{J} , den diese BCCE erzeugt, ist im full-flow-case eine 2D-Mannigfaltigkeit. Dieser Raum wird von den Eigenvektoren \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_2 aufgespannt, die zu den zwei kleinsten Eigenwerten von \mathbf{J} gehören. Um die Disparität v_x zu bestimmen, wird eine Linearkombination \mathbf{p}_s der Eigenvektoren \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_1 mit verschwindendem viertem Eintrag (d.h. $dt = 0$) gewählt. Dies ist der Schnitt der 2D-Nullraum-Mannigfaltigkeit mit der x-s-Ebene. Die Disparität v_x ist dann $v_x = \mathbf{p}_{s1}/\mathbf{p}_{s3}$. Um das Bewegungsfeld \mathbf{u} zu erhalten, wird eine Linearkombination \mathbf{p}_t mit verschwindendem dritten Eintrag gewählt (d.h. $ds = 0$). Diese Linearkombination ist die Richtung des Schnittes des 2D-Nullraumes mit dem x-y-t-Raum (d.h. die geschätzte Trajektorie). Es ergeben sich $u_x = \mathbf{p}_{t1}/\mathbf{p}_{t4}$ und $u_y = \mathbf{p}_{t2}/\mathbf{p}_{t4}$.

2.2.3 Erweiterung der BCCE auf Divergenzschätzung

Wieder sei ein Grauwert $g(x, y, s, t)$ mit dem Helligkeitsmodell $dg/dt=0$ kombiniert, es liefert mit $\frac{\partial g}{\partial^*} = g_*$:

$$dg(x, y, s, t) = g_x dx + g_y dy + g_s ds + g_t dt = 0 \quad (2.17)$$

Die Überlegungen im letzten Abschnitt setzen ein Bewegungsmodell der Form $(X, Y, Z)(t) = (X_0, Y_0, Z_0) + (U_X, U_Y, 0) t$ voraus, d.h. die Bewegung des Objekts in z-Richtung wird vernachlässigt. Dies kann auf allgemeine dreidimensionale Dynamiken ausgedehnt werden. Das Bewegungsmodell für einen Punkt in Weltkoordinaten (X, Y, Z) sei

$$(X, Y, Z)(t) = (X_0, Y_0, Z_0) + (U_X, U_Y, U_Z) t \quad (2.18)$$

Damit wird angenommen, dass die Z-Bewegung des Objektes in Kamerarichtung die gleiche Größenordnung wie die XY-Bewegungen hat. Die Projektion dieser Position durch ein Lochkamera an der Stelle $X_s = V_X s$ liefert für die Bildkoordinaten x und y die Ausdrücke $x = f(X - V_X s)/Z$ und $y = fY/Z$. Damit erhält man

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}(s, t) = \frac{f}{Z_0 + U_Z t} \begin{pmatrix} X_0 - V_X s + U_X t \\ Y_0 + U_Y t \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Die korrespondierenden totalen Differentiale sind

$$\begin{aligned} dx &= \frac{f}{Z_0 + U_Z t} \left((U_X - U_Z \frac{x}{f}) dt - V_x ds \right) \\ dy &= \frac{f}{Z_0 + U_Z t} (U_Y - U_Z \frac{y}{f}) dt \end{aligned} \quad (2.20)$$

Bei üblichen Aufnahmebedingungen ist es gerechtfertigt anzunehmen, dass die Entfernung des beobachteten Objekts von der Kamera deutlich größer ist als dessen Bewegung in Kamerarichtung zwischen zwei Bildern. D.h. man kann wie folgt approximieren: $|Z_0| \gg |U_Z t| \Leftrightarrow Z_0 + U_Z t \approx Z_0$. Mit den Substitutionen

$$\begin{aligned} \text{Disparität } v_x &:= -fV_X/Z_0 \\ \text{optischer Fluss } u_x &:= fU_X/Z_0, \quad u_y := fU_Y/Z_0 \\ \text{Divergenz } u_z &:= -U_Z/Z_0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

werden die Differentiale dx und dy zu

$$\begin{aligned} dx &= u_x dt + u_z x dt + v_x ds \\ dy &= u_y dt + u_z y dt \end{aligned} \quad (2.22)$$

Setzt man diese dx, dy in (2.17) ein und sortiert die Terme um, so folgt:

$$dg = g_x(v_x ds + u_x dt) + g_y u_y dt + (g_x x + g_y y) u_z dt + g_s ds + g_t dt = 0 \quad (2.23)$$

Dies ist eine optische Kontinuitätsgleichung für kombinierte Scene-Flow- und Disparitäts-Bestimmung. Der Ausdruck $(g_x x + g_y y) u_z$ ist aus affinen Bewegungsmodellen bekannt. Dort wird er zur Divergenzbestimmung benutzt, wenn x und y lokale, nicht globale Bildkoordinaten sind. Bei Benutzung des Strukturtenzorverfahrens (vergleiche Kapitel 2.1.2) führt der Ausdruck $(g_x x + g_y y) u_z$ zu instabilen Schätzungen. Dieses Problem kann durch die Einführung lokaler Koordinaten $(\Delta x, \Delta y)$ umgangen werden:

$$\begin{aligned} x &= x_0 + (x - x_0) =: x_0 + \Delta x \\ y &= y_0 + (y - y_0) =: y_0 + \Delta y \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dies gilt für jede lokale Nachbarschaft, die vom Strukturtenzor benutzt wird, dabei ist (x_0, y_0) der zentrale Pixel der lokalen Nachbarschaft. Dann wird (2.19) zu

$$\begin{aligned} dg &= g_x(v_x ds + (u_x + x_0 u_z) dt) + g_y(u_y + y_0 u_z) dt + \\ &+ (g_x \Delta x + g_y \Delta y) u_z dt + g_s ds + g_t dt = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

In vorliegender BCCE lauten die Ausdrücke für Daten- und Parametervektor wie folgt:

$$\begin{aligned} \mathbf{d} &= (g_x, g_y, g_x \Delta x + g_y \Delta y, g_s, g_t)^T \\ \mathbf{p} &= (v_x ds + (u_x + x_0 u_z) dt, (u_y + y_0 u_z) dt, u_z dt, ds, dt)^T \end{aligned} \quad (2.26)$$

Der korrespondierende Nullraum des Strukturtenzors \mathbf{J} ist eine 2D-Mannigfaltigkeit (vergleiche Kapitel 2.2.2). Sie wird von den Eigenvektoren $\tilde{\mathbf{p}}_1, \tilde{\mathbf{p}}_2$ aufgespannt, die zu den zwei kleinsten Eigenwerten von \mathbf{J} gehören.

Die Disparität v_x wird über die Linearkombination $\tilde{\mathbf{p}}_s = \alpha_1 \tilde{\mathbf{p}}_1 + \alpha_2 \tilde{\mathbf{p}}_2$ der Eigenvektoren mit verschwindendem fünften Eintrag berechnet (d.h. $dt = 0$ in (2.22)). Dann gilt $\tilde{\mathbf{p}}_s = (v_x ds, 0, 0, ds, 0)^T$. Die Disparität v_x ist dann $v_x = \tilde{\mathbf{p}}_{s1} / \tilde{\mathbf{p}}_{s4}$.

Der Scene-Flow \mathbf{u} wird über die Linearkombination $\tilde{\mathbf{p}}_t = \beta_1 \tilde{\mathbf{p}}_1 + \beta_2 \tilde{\mathbf{p}}_2$ der Eigenvektoren mit verschwindendem viertem Eintrag berechnet (d.h. $ds = 0$ in (2.22)). Dann gilt $\tilde{\mathbf{p}}_t = ((u_x + x_0 u_z)dt, (u_y + y_0 u_z)dt, u_z dt, 0, dt)^T$. Zuerst wird u_z über $u_z = \tilde{\mathbf{p}}_{t1}/\tilde{\mathbf{p}}_{t5}$ berechnet, dann erhält man $u_x = \tilde{\mathbf{p}}_{t1}/\tilde{\mathbf{p}}_{t4} - x_0 u_z$ und $u_y = \tilde{\mathbf{p}}_{t2}/\tilde{\mathbf{p}}_{t4} - y_0 u_z$. Mit (2.17) kann dann auf Tiefe und 3D-Bewegung in Weltkoordinaten umgerechnet werden.

2.3 Zusammenfassung

Nach einer Darstellung des bekannten erweiterten Strukturtensorverfahrens wurden zwei neu entwickelte Erweiterungen vorgestellt. Die Interpretation von linear angeordneten Kamerapositionen als neuer Dimension ermöglicht die Auswertung von Mehrkamerasequenzen als 4D-Datensatz. Bei Annahme eines geeigneten Grauwert-, Kamera- und Bewegungsmodells kann die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses (BCCE) so erweitert werden, dass simultan neben dem Bewegungsfeld der Beobachtungsobjekte deren Tiefe bestimmt werden kann. Durch Einführung eines 3D-Bewegungsmodells kann die BCCE nochmals verallgemeinert werden; zusätzlich kann dann über die Schätzung der lokalen Divergenz noch die Geschwindigkeit der Objekte in Kamerarichtung geschätzt werden. Damit kann das vollständige 3D-Bewegungsfeld der Objekte bestimmt werden.

Kapitel 3

Wachstum verformbarer Oberflächen

In der vorliegenden Anwendung wird die Verformung der Oberflächen von Pflanzenorganen untersucht. Oberflächenwachstum hat für Pflanzen eine hohe Bedeutung, da sie ihre äußere Oberfläche viel intensiver als Tiere für Stoffaustausch und Energiegewinnung nutzen. Photosynthese, Wasser- und Nährstoffaufnahme über Wurzeln sowie Gasaustausch sind Prozesse, die hauptsächlich an der Außenfläche der Pflanzen stattfinden. Von besonderem Interesse ist dabei der lokale relative Flächenzuwachs, die *relative Wuchsrate*.

Eine Methode zur Bestimmung der relativen Wuchsrate ist die Berechnung der Divergenz des 2D-Bewegungsvektorfeldes des Beobachtungsobjektes [75][73][43]. Deren Oberflächen müssen allerdings in fester Tiefe fronto-parallel, d.h. senkrecht zur Kameraachse, liegen, damit diese Methode korrekte Ergebnisse liefert [79][72]. Das in Kapitel 2.2 vorgestellte Verfahren liefert 3D-Oberflächenkoordinaten und deren 2D-Bewegungsfeld. Für den Fall solcher Daten kann die Wuchsrate alternativ bestimmt werden. Dieses Kapitel stellt ein Verfahren vor, bei dem die Wuchsrate aus der Verformung eines Gitters bestimmt wird.

3.1 Wuchsraten

Verformungen von Objektoberflächen gehen meist mit Größenänderungen einher, Ausnahmen sind Scherungen, diese kommen bei wachsenden Pflanzen nicht vor. Von botanischem Interesse ist die Berechnung von Wuchsraten auf der Oberfläche von Pflanzenorganen. Eine übliche Definition der Wuchsrate lautet wie folgt [91]:

Die Wuchsrate einer Größe X gibt an, um welchen Betrag ΔX die Größe X in einer bestimmten Zeit Δt zugenommen hat.

Man spricht von einer *absoluten Wuchsrate*, wenn der Zuwachs ΔX in der Einheit von X angegeben wird. Wird ΔX dagegen als Bruchteil von X in Prozent angegeben, so spricht man von einer *relativen Wuchsrate* oder *RGR* (“Relative Growth Rate”). Im Kontext dieser Arbeit ist mit einer Wuchsrate stets die relative Wuchsrate gemeint.

Die relative Wuchsrate *RGR* kann mathematisch wie folgt formuliert werden:

$$RGR = \frac{1}{A(t)} \frac{dA(t)}{dt} = \frac{d(\ln A(t))}{dt} \quad (3.1)$$

Bezieht man die relative Wachsrte auf einen Zeitraum T , so folgt für diese mittlere relative Wachsrte:

$$\overline{RGR} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{d(\ln A(t))}{dt} dt = \frac{1}{T} \ln \left(\frac{A(T)}{A(0)} \right) \quad (3.2)$$

3.1.1 Wachsrte und Divergenz

Im klassischen Ansatz zur Messung von Objektwachstum werden die Objekte als kompressible Flüssigkeiten betrachtet. Die Geschwindigkeit jedes Teilvolumenelementes wird durch das Vektorfeld $\mathbf{f} = (U, V, W)^T$ gegeben (Abbildung 3.1). Voraussetzung für die folgenden Überlegungen ist die totale Differenzierbarkeit des Verschiebungsvektorfeldes \mathbf{f} . Man betrachtet ein Volumenelement $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ zum Zeitpunkt t und das veränderte Volumen V' zum späteren Zeitpunkt t' . Die Definition der Volumendilatation lautet folgendermassen:

$$\theta = \frac{V' - V}{V} \quad (3.3)$$

Diese Definition der Volumendilatation korrespondiert offensichtlich mit der botanischen Definition (3.1). Die linke bzw. rechte Seite des Volumenelements bewegen sich in erster Näherung mit den Geschwindigkeiten U und $U + \frac{\partial U}{\partial x} dx$. Nach einer kurzen Zeit dt ändert sich V also zu

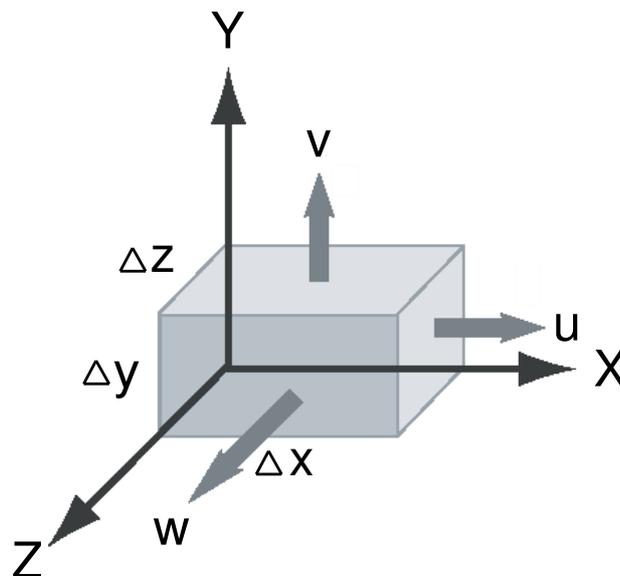


Abbildung 3.1: Volumenänderung durch ein divergierendes Verschiebungsvektorfeld [79].

$V' = \Delta x' \Delta y' \Delta z'$. Dabei gilt: $\Delta x' = \Delta x + \Delta x dt \frac{\partial U}{\partial x}$. Bei analoger Argumentation für die y- und z-Achsen ergibt sich für das neue Volumen dV' :

$$V' = V \left(1 + dt \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) \right) \quad (3.4)$$

Damit folgt für die ‘‘Geschwindigkeit der Volumendilatation’’ aufgrund von Bewegung [29]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \mathbf{f} = \text{div}(\mathbf{f}) \quad (3.5)$$

Damit entspricht die Divergenz des Verschiebungsvektorfeldes \mathbf{f} der Rate, in der sich die Größe eines Volumenelements ändert. Die relative Wachsrate RGR wird oft in Prozent pro Zeitintervall angegeben. Damit lautet eine alternative Definition zu der in (3.1):

$$RGR = \text{div}(\mathbf{f}) \cdot 100[\%/t] \quad (3.6)$$

Diese Formel kann benutzt werden, um die Volumenwachsraten in volumetrischen Daten zu berechnen [45][70]. Digitale Kameras liefern aber nur Informationen über Oberflächen von Objekten, d.h. auch die Bewegungsvektorfelder sind nur auf den Oberflächen der Objekte definiert. Deshalb seien im Folgenden die ein- und zweidimensionalen Fälle vorgestellt.

3.1.2 Wachstum in ein und zwei Dimensionen

Das Wachstum von Pflanzen beruht auf der Neubildung und Vergrößerung von Zellen, es ist also stets ein dreidimensionaler Prozess. In Spezialfällen kann das Wachstumsverhalten aber auf weniger Dimensionen reduziert werden. Wurzeln ändern ihren Durchmesser kaum, während sie wachsen. Ihr Wachstum kann also auf näherungsweise eine Dimension reduziert werden. Ist das Koordinatensystem parallel zur x-Achse, so vereinfacht sich (3.6) zu:

$$RGR = \partial_x U \cdot 100[\%/t] \quad (3.7)$$

Dieser Zusammenhang wurde benutzt, um das Wachstumsverhalten von Pflanzenwurzeln zu untersuchen [44][86]. So ist bei Maiswurzeln die sich kurz hinter der Spitze befindende Wachstumszone gut zu erkennen (Abbildung 3.2).

Zweidimensionales Wachstum kann äquivalent über die folgende Vereinfachung von (3.6) berechnet werden:

$$RGR = (\partial_x U + \partial_y V) \cdot 100[\%/t] \quad (3.8)$$

Das in Kapitel 2.1 beschriebene Verfahren zur Messung des optischen Flusses liefert ein zweidimensionales Verschiebungsvektorfeld $\mathbf{f} = (u_x, u_y)^T$ [19][8], dessen Divergenz liefert die Wachsraten.

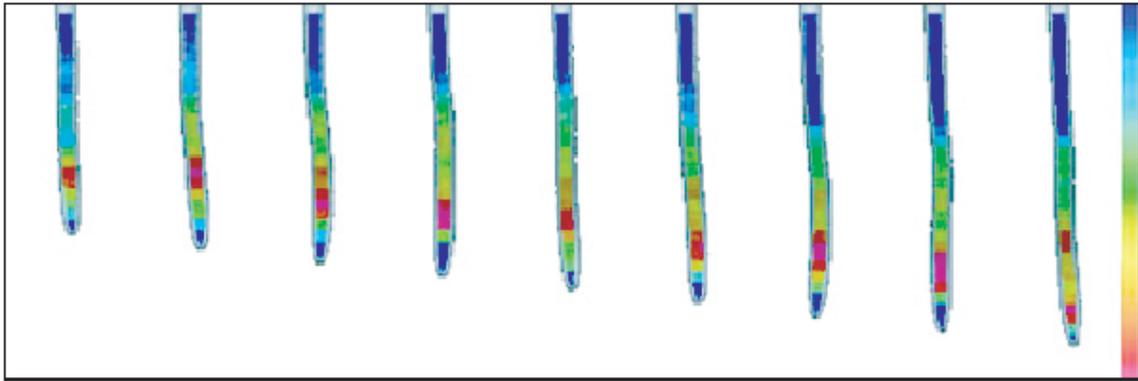


Abbildung 3.2: Wachsende Maiswurzel mit überlagerten Wachsraten. Die Position der Wachstumszone relativ zur Wurzelspitze bleibt durch die Sequenz näherungsweise konstant. Die maximalen Werte (rot) liegen bei $0.3\%/h$, die Zeit zwischen den Darstellungen liegt bei 15 Minuten, die Länge liegt bei 12 mm.

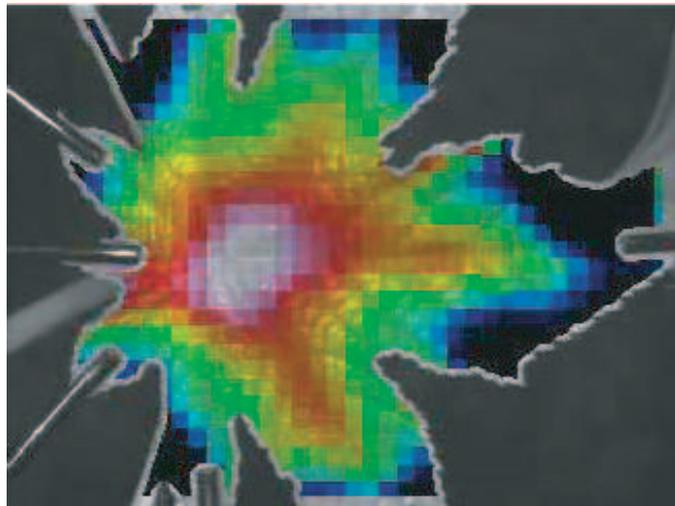


Abbildung 3.3: Wachsendes Rizinusblatt mit überlagertem Wachsratenverlauf [91]. Die Wachstumsrate ist im Zentralbereich des Blattes maximal und fällt zu den Rändern hin ab. Im Zentrum des Blattes liegt die Wachstumsrate bei etwa $2\%/h$.

Angewandt wird dieses Verfahren in der Untersuchung von wachsenden Blättern [92][93]. Diese werden fronto-parallel fixiert (Abbildung 3.3): Offensichtlich führt eine Bewegung der Beobachtungsobjekte in Kameraachsenrichtung zu einer scheinbaren Größenänderung im Bild, diese Bewegungen verfälschen also den berechneten optischen Fluss und somit auch die Wachstumsrate.

3.1.3 Grenzen der Divergenzmethode

Die vorgestellte Methode zur Berechnung von Wachsraten aus der Divergenz des 2D-Bewegungsfeldes hat als Voraussetzung, dass das Beobachtungsobjekt in einer fronto-parallelen Ebene liegt und dort bleibt. Es sind zwei abweichende Verhalten denkbar: Das Objekt ändert seine Entfernung Z zur Kamera oder seine Neigung m . Im Folgenden wird eine Abschätzung der

resultierenden Abweichungen vorgestellt.

Bei Annahme eines Lochkammermodells wird eine Fläche $A = \Delta X \Delta Y$ in der Bildebene auf eine Fläche $a = \Delta x \Delta y = \frac{f^2}{Z^2} A$ abgebildet. Diese projizierte Fläche hängt von der Objektentfernung gemäss $\frac{\partial a}{\partial Z} = -2 \frac{f^2}{Z^3} A$ ab. Eine Änderung in der Objektentfernung führt also zu einer Änderung in der projizierten Fläche, selbst wenn die Objektfläche konstant bleibt. Eine Tiefenbewegung um die Strecke δZ führt zu einer relativen Flächenänderung:

$$\frac{\delta a}{a} = -2 \frac{\delta Z}{Z} \quad (3.9)$$

So führen z.B. Bewegungen von $\delta Z = 1.5 \text{ mm/h}$ bei einer Objektentfernung von $Z = 300 \text{ mm}$ zu Fehlern der Größenordnung $1 \text{ \%}/h$ in der berechneten Wachstumsrate [79][72].

Diese Überlegungen beziehen sich auf eine Ebene, die senkrecht zur Kameraachse steht. Für den Fall einer geneigten Ebene ergeben sich folgende Abhängigkeiten: Sei die Ebene so orientiert, dass sie in x-Richtung mit der Steigung m geneigt sei, d.h. $m = Z_x/X_x$ und $Z_y = 0$. Die Projektion des Flächenelements A auf die Bildebene ergibt dann ein Flächenelement a :

$$a = \Delta x \Delta y = A \frac{f^2}{Z^2} (1 + m\bar{x}) = A \frac{f^2}{Z^2} \left(1 + m \frac{X}{Z}\right) \quad (3.10)$$

Dabei ist $\bar{x} = x/f = X/Z$. Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss Änderungen der Parameter Z , m und X haben.

Eine Tiefenänderung δZ bewirkt eine relative Flächenänderung von:

$$\left(\frac{\delta a}{a}\right)_Z = \frac{(\partial_Z a) \delta Z}{a} = -2 \frac{\delta Z}{Z} \cdot \frac{Z + 1.5mX}{Z + mX} \quad (3.11)$$

Vergleicht man diesen Ausdruck mit (3.9), dann taucht ein zusätzlicher Faktor auf. Dieser hängt von der Tiefe Z , der Position X und der Neigung m ab. Je größer X und m , desto bedeutender wird die Abweichung.

Auch eine Änderung der Neigung m oder der Position X hat Einfluss auf die projizierte Fläche (3.10). Eine Ableitung nach den entsprechenden Variablen führt zu folgenden relativen Flächenänderungen:

$$\left(\frac{\delta a}{a}\right)_m = \frac{X}{Z + mX} \delta m \quad (3.12)$$

Je größer der Abstand X von der Bildmitte ist, desto stärker ist der Einfluss durch eine Oberflächenneigung m . Bei einer Objektposition $Z = 300 \text{ mm}$, $X = 30 \text{ mm}$ und einer ursprünglich frontoparallelen Lage ($m = 0$) werden Wachstumsraten im Bereich 1 \% gemessen, falls sich die Neigung um $\delta m = 0.1$ ändert. Bei einem Zusammenhang $m = \tan \vartheta$ entspricht dies einem Neigungswinkel von 5.7° .

Der durch eine Verschiebung in X hervorgerufene Fehler in der Wachsrates steigt mit der Neigung:

$$\left(\frac{\delta a}{a}\right)_X = \frac{m}{Z + mX} \delta X \quad (3.13)$$

Horizontale Bewegungen eines fronto-parallelen Objekts rufen keine scheinbaren Größenänderungen dieses Objekts hervor. Anders liegt der Fall bei geneigten Objektoberflächen: Ist die Oberfläche um $\vartheta = 15^\circ$ ($k = 0.27$) geneigt, $Z = 300 \text{ mm}$ und $X = 50 \text{ mm}$, so wird eine Wachsrates von $1 \text{ \%}/h$ hervorgerufen durch eine horizontale Verschiebung von $X = 12 \text{ mm}/h$.

Alle angegebenen Werte für Bewegungen der Aufnahmeobjekte sind für den Fall von Pflanzenblättern realistisch. Da die Wachsrates von Pflanzenorganen üblicherweise im Bereich einiger $\text{\%}/h$ liegen, sind die systematischen Fehler durch die Berechnung der Wachsrates als Divergenz des Bewegungsvektorfeldes zu groß. Um auf den Oberflächen von frei beweglichen oder geneigten Objekten Wachsrates zu berechnen, muss also ein anderer Ansatz verfolgt werden. Eine Möglichkeit hierzu wird im nächsten Abschnitt vorgeschlagen.

3.2 Wachsratesberechnung auf verformbaren Gittern

Die Überlegungen im letzten Teilkapitel haben gezeigt, dass für die Berechnung von Wachsrates auf geneigten, bewegten Objektoberflächen ein anderer Ansatz verfolgt werden muss: Die Berechnung als Divergenz des 2D-Bewegungsfeldes geht mit signifikanten systematischen Fehlern einher.

Ein alternativer Ansatz zur Bestimmung der Wachsrates ist ein der botanischen Definition (3.1) entsprechender. Betrachtet man eine im Raum liegende verformbare Oberfläche als aus Teilflächen zusammengesetzt, so kann die RGR auf den Teiloberflächen durch deren Flächenänderungen zu aufeinanderfolgenden Zeiten berechnet werden. D.h. zur Berechnung von Wachsrates auf Teilflächen muss deren Lage und Bewegung zu allen Zeitpunkten bekannt sein.

Das in Kapitel 2.2 vorgestellte Stereoverfahren liefert zu jedem Zeitpunkt eine Tiefenkarte in Weltkoordinaten Z . Die xy -Position der Oberflächenpunkte sowie die xy -Komponente ihres Bewegungsvektorfeldes werden in Sensorkoordinaten, d.h. in Pixel, ausgegeben. Für eine volle Kenntnis der räumlichen Lage und Bewegung der Objektoberfläche ist also eine Berechnung der z -Komponente des Geschwindigkeitsfeldes, eine Umeichung der Sensor- in Weltkoordinaten und schließlich eine sinnvolle Unterteilung in sich verformende Teiloberflächen notwendig.

3.2.1 Berechnung der Tiefengeschwindigkeit

Aus den Objektoberflächendaten $Z(x, y, t)$ zu zwei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten t_0 und t_1 sowie des xy -Geschwindigkeitsfeldes (u_x, u_y) zum ersten Zeitpunkt t_0 soll die Z -Geschwindigkeit U_Z zur Zeit t_0 bestimmt werden (Abbildung 3.4). Dafür gilt folgender Zusammenhang:

$$U_Z(x, y, t_0) = \frac{Z(x + u_x \Delta t, y + u_y \Delta t, t_1) - Z(x, y, t_0)}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Dabei ist $\Delta t = t_1 - t_0$. Da $Z(x + u_x \Delta t, y + u_y \Delta t, t_1)$ im Allgemeinen nicht auf ganzzahligen Pixelpositionen liegt, wurde linear auf Zwischenpixelpositionen interpoliert.

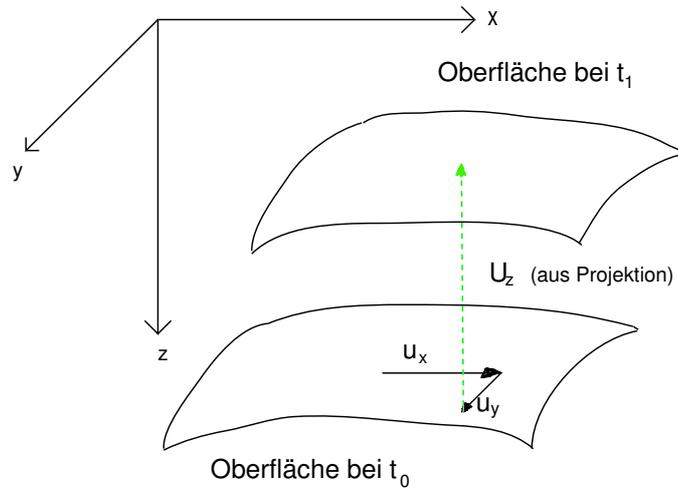


Abbildung 3.4: Bestimmung der Geschwindigkeit in z-Richtung durch Projektion des xy-Flusses auf zeitlich aufeinander folgende Oberflächen.

3.2.2 Transformation in Weltkoordinaten

Aus der Stereorekonstruktion selbst sind nur die zu den Pixelpositionen korrespondierenden Tiefen bekannt: Die xy-Lage der Pixel muss in Weltkoordinaten umgerechnet werden. Vorausgesetzt sei die Kenntnis des Verhältnisses k_E der Weltlänge R_E zur Pixellänge r_E im Bild bei einer Eichtiefe Z_E . Außerdem sei die Brennweite f der Kamera bekannt. Diese Daten werden von Kamerakalibrierungen geliefert (z.B. [98][99]).

Wie schon erwähnt werden Objekte fester Größe, die sich der Kamera nähern, als wachsend gesehen, d.h. die Ausdehnung in xy-Richtung im Bild nimmt zu, obwohl die wirkliche Objektgröße konstant bleibt. Die Stärke der Verzerrung ist tiefenabhängig. Dieser Effekt kann bei Annahme eines Lochkameramodells durch eine tiefenabhängige zentrische Streckung bzw. Stauchung relativ zum Bildmittelpunkt korrigiert werden. Aus einer Kalibrierung sei folgender Zusammenhang bekannt (Abbildung 3.5):

$$\frac{r_E}{f} = \frac{R_E}{Z_E} \quad (3.15)$$

Gesucht ist die Weltposition (X_0, Y_0) einer Pixelposition (x_0, y_0) mit der bekannten Welttiefe $Z_0(x_0, y_0)$. Alle Pixelpositionen wurden vorher in Bildzentrumskordinaten umgerechnet, d.h. der Abstand r_0 zum Bildmittelpunkt ist $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$. Für die Weltlänge R_0 gilt:

$$\frac{R_0}{Z_0} = \frac{r_0}{f} \quad (3.16)$$

Mit (3.15) folgt daraus:

$$R_0 = \frac{Z_0 r_0}{f} = \frac{R_E}{r_E} \frac{Z_0}{Z_E} r_0 \quad (3.17)$$

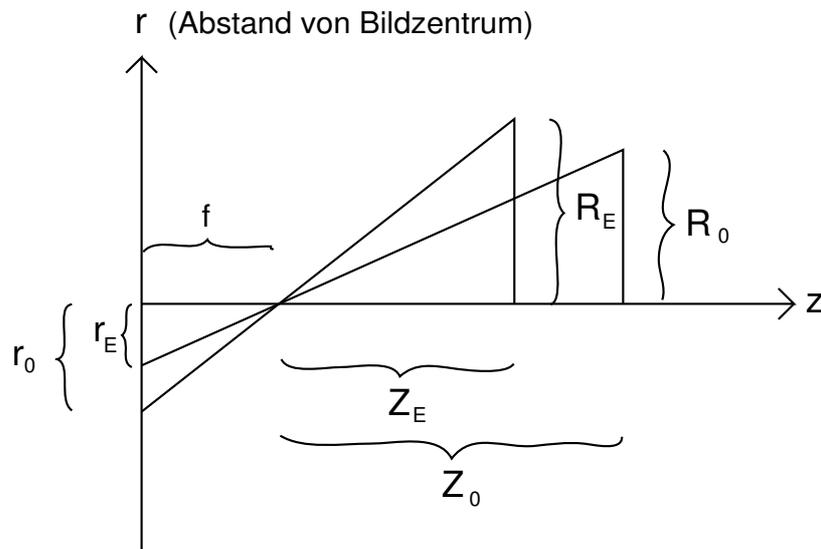


Abbildung 3.5: Umeichung in Weltkoordinaten. Tiefenabhängig wird jede Pixelposition relativ zur Bildmitte zentrisch gestreckt bzw. gestaucht. Gezeigt sind die Strahlengänge für die Kalibrieraufnahme und eine Pixelposition.

Diese Rechnungen können komponentenweise durchgeführt werden. Definiert man außerdem einen Eichfaktor $k_E = \frac{R_E}{r_E}$, so folgt für die den Pixelkoordinaten (x_0, y_0) zugeordneten Weltkoordinaten (X_0, Y_0) :

$$X_0 = k_E \frac{Z_0(x_0, y_0)}{Z_E} x_0, \quad Y_0 = k_E \frac{Z_0(x_0, y_0)}{Z_E} y_0 \quad (3.18)$$

Die hier beschriebene Umeichung wird zweimal durchgeführt: Zum einen für alle Positionen der Objektoberfläche (d.h. die Basispositionen der Flussvektoren), zum anderen für alle Positionen der Flussfeldvektorspitzen.

3.2.3 Teilflächenexpansion eines Gitters

Durch die Umeichung in Weltkoordinaten liegt die Oberfläche des Beobachtungsobjektes nun in kartesischen xyz-Koordinaten relativ zur Kameraachse vor. Außerdem ist von jedem Oberflächengitterpunkt bekannt, wohin er sich bewegt.

Als Teiloberflächen des Beobachtungsobjektes werden die Flächen definiert, die in Sensorkoordinaten den Umgebungen von Pixeln zugeordnet werden kann. Wie erscheint die so gesehene Objektoberfläche in Weltkoordinaten? Die zentrische Streckung bei der Umeichung bedingt eine leichte Verzerrung der ursprünglich quadratischen (falls dies die Anordnung der Pixel auf dem Sensor ist) xy-Lage der Gitterpunkte (Abbildung 3.6). In der Zeichnung entsprechen die Kreuzungen der Gitterlinien den Gitterpunkten. Jedem Gitterpunkt wird jetzt die Fläche des Trapezes zugeordnet, das entsteht, wenn die Nachbargitterpunkte verbunden werden. Die Fläche der vier Teildreiecke, aus denen sich das Trapez zusammensetzt, kann leicht über die Kreuzprodukte der Positionsdifferenzvektoren berechnet werden.

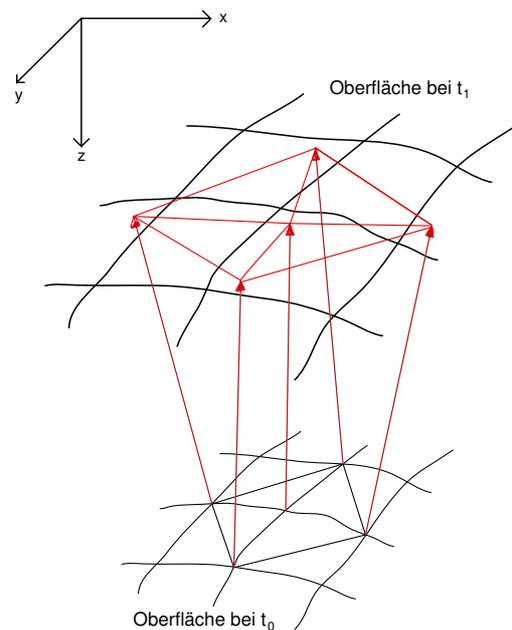


Abbildung 3.6: Bestimmung der relativen Flächenwuchsrates aus dem Verhältnis von lokalen Flächenelementen zu aufeinanderliegenden Zeitpunkten. Den Flächenelementen sind Pixelumgebungen zugeordnet, diese setzen sich aus vier Teildreiecken zusammen. Zu beiden Zeitpunkten liegen die Oberflächenelemente auf der Oberfläche.

Von jedem der dieses Viereck aufspannenden Gitterpunkte ist bekannt, wohin er sich in der Zeit zwischen zwei Aufnahmen bewegt. Somit kann auch für den nächsten Zeitpunkt eine korrespondierende Vierecksfläche berechnet werden. Der Quotient der zu sukzessiven Zeitpunkten t_0 und t_1 berechneten Vierecksflächen liefert die Wachstumsrate des zugehörigen Gitterpunktes zum Zeitpunkt t_0 . Der botanischen Definition (3.1) folgend ergibt sich also für die relative Wachstumsrate:

$$\overline{RGR}(X, Y, Z, t_0) = \frac{1}{\Delta t} \ln \left(\frac{A(X + U_X \Delta t, Y + U_Y \Delta t, Z + U_Z \Delta t, t_1)}{A(X, Y, Z, t_0)} \right) \quad (3.19)$$

Dabei ist $\Delta t = t_1 - t_0$. Die verschobenen Gitterpunkte zum Zeitpunkt t_1 liegen nicht an Pixelpositionen entsprechenden Koordinaten. Dies entspricht der Bewegung der Strukturen im Bild.

3.3 Zusammenfassung

Ausgehend von der botanischen Definition wurde die mathematische Formulierung von Wachstumsraten als Divergenz eines Verschiebungsvektorfeldes hergeleitet. Für den vereinfachten zweidimensionalen Fall hat eine Genauigkeitsabschätzung gezeigt, dass die Fehler der berechneten Wachstumsrate als Divergenz des Flussfeldes groß sind: Änderungen der Objektiefe oder -neigung führen zu Fehlergrößen im Bereich der gemessenen Wachstumsraten. Falls Objektiefe und xy-Fluss bekannt sind, kann die Wachstumsrate alternativ berechnet werden: Es wurde beschrieben, wie nach Berechnung der Tiefengeschwindigkeit und einer zentrischen Umeichung die Wachstumsrate lokal als Verformung der den Pixelpositionen zugeordneten Teilflächen berechnet werden kann.

Kapitel 4

Rekonstruktion ausgedehnter Oberflächen

Große Objekte lassen sich mit dem vorgestellten Stereoverfahren nicht einfach erfassen: Um dem Modell einer idealen Lochkamera möglichst gerecht zu werden, ist die Verwendung von verzerrungsarmen Kameraoptiken sinnvoll. Solche Objektive haben aber Öffnungswinkel. So liegen die Öffnungswinkel der bei allen Experimenten benutzten 25mm-Objektive bei horizontal etwa $\beta_x = 12^\circ$, vertikal etwa $\beta_x = 9^\circ$. Deshalb sind Verfahren sinnvoll, die Oberflächeninformationen von verschiedenen Kamerapositionen kombinieren.

Eine Reihe von Ansätzen zur Rekonstruktion weiter Raumwinkelbereiche ist bekannt: Vielfach benutzt sind Verfahren die Einzelbilder einer drehenden Kamera zu einem Panoramamosaik zusammensetzen [13][67][83]. Die Koppelung der Rekonstruktion weiter Winkelbereiche mit der Gewinnung von Tiefeninformation ist ein bekanntes Problem. Manche Verfahren benutzen gewölbte Spiegel (“Omniview”), um Sehbereiche zu vergrößern [62][74][68], andere Ansätze kombinieren polar rotierte Tiefenbilder zu einem 3D-Panorama [65][66].

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren fusioniert Teiloberflächendaten von einem Kameraset, das auf einen um zwei Achsen drehbaren rechnergesteuerten Roboterarm montiert ist. Diese quasi ortsfeste Konfiguration erlaubt die Erfassung sehr weiter Raumwinkelbereiche durch Rotation des Kameraaufbaus. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels ist mit dem Begriff Kameraposition stets die Position von Kamera und Verschiebetisch gemeint. Es wird beschrieben, wie die sphärische Geometrie der Kameraorientierungen die Separierung überlappender Nachbarbereiche erlaubt. Durch eine Reihe von Koordinatentransformationen wird dann die Tiefeninformation aus Teilbildern zu einer Gesamtoberfläche fusioniert.

4.1 Fusion rotierter Teilrekonstruktionen

Zur Fusion von Oberflächeninformation wird im vorgestellten Verfahren für jede Kameraposition separat eine Teiloberfläche berechnet und deren Lage zueinander aus der zugrundeliegenden sphäri-

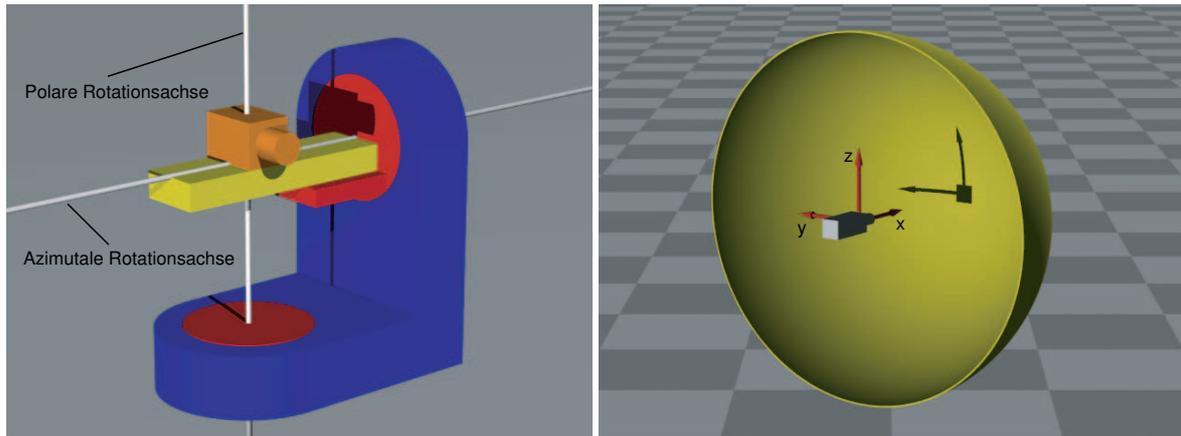


Abbildung 4.1: Drehbarer Kameraarm: (*links*) Dieser ist um zwei Achsen rotierbar, womit ein weiter Raumwinkelbereich für Aufnahmen zugänglich wird. Die Kamera kann zusätzlich noch per Verschiebetisch (gelb) bewegt werden. (*rechts*) Skizze des per Kameraarm einsehbaren Raumwinkelbereichs: Die drehbare Kamera ruht im Ursprung eines Koordinatensystems. Durch Rotationen um die y - und z -Achse deckt das Sichtfeld der Kamera die gesamte Halbkugel ab.

schen Geometrie berechnet. Kamera und Verschiebetisch sind auf einen um zwei Achsen rotierbaren Kameraarm montiert (Abbildung 4.1 links). Die Positionierung des Arms erfolgt rechnergesteuert. Die Rotationswinkel der einzelnen Kamerapositionen werden dabei als bekannt angenommen. Dies ist möglich, da die Genauigkeit des verwendeten Kameraarms hoch ist; der Fehler der angefahrenen Positionen liegt bei 18 Bogensekunden, was bei einem Radius von 10 Metern einer Ungenauigkeit von etwa 1 mm entspricht. Alle folgenden Winkelangaben sind in Grad.

Die Kamera wurde so montiert, dass die Rotationsachsen des Kameraarms in der Sensorebene liegen. Damit verschieben Rotationen Objekte im Kamerabild in x - und y -Richtung. Bei der Positionierung der Kamera wurde darauf geachtet, dass die mittlere Verschiebetischposition möglichst nahe am Schnittpunkt der Rotationsachsen liegt. Im Folgenden wird die Position des Sensormittelpunktes als fix angenommen, er wird lediglich rotiert. Diese vereinfachte Annahme ist gerechtfertigt, falls die Beobachtungsobjekte in großer Entfernung liegen: Der Fehler durch eine nichtzentrale Positionierung der Kamera liegt in der Größenordnung des Abstandes von Rotationsachse und Kamera, ist also bei großen Objektentfernungen vernachlässigbar. Bei den im Rahmen dieser Doktorarbeit durchgeführten Experimenten ist dies der Fall, die Entfernung des Sensormittelpunktes von den Drehachsen liegt bei wenigen Zentimetern.

4.1.1 Die Geometrie rotierter Raumwinkelbereiche

Der beschriebene Aufbau aus Kamera und Roboterarm besitzt eine sphärische Symmetrie. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie diese benutzt werden kann, um die Lage der Teiloberflächen zueinander zu berechnen und sich überlappende Bereiche zu verhindern. Der Sensormittelpunkt der drehbaren Kamera sei am Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems positioniert. Der für den Kameraarm zugängliche Raumwinkelbereich beträgt in horizontaler und vertikaler Richtung jeweils 180° . Dieser Raumwinkelbereich lässt sich durch eine Halbkugelschale darstellen (Abbildung 4.1 rechts).

Die Kamera sei so ausgerichtet, dass die Kameraachse horizontal liegt. Schwenkt man die Kamera in horizontaler Richtung, so sieht sie einen Streifen im Äquatorialbereich der Halbkugelschale (Abbildung 4.2 oben links). Die Breite des Streifens beträgt in Azimutalrichtung den vertikalen Öffnungswinkel β_y . Schwenkt man die Kamera vertikal, so sieht sie einen Streifen mit horizontalem Öffnungswinkel β_x (Abbildung 4.2 oben rechts).

Das Problem wird deutlich, wenn man die Kamera nun polar um β_x rotiert: Die von den horizontalen Nachbarpositionen gesehenen Raumwinkelbereiche überlappen einander (Abbildung 4.2 unten)

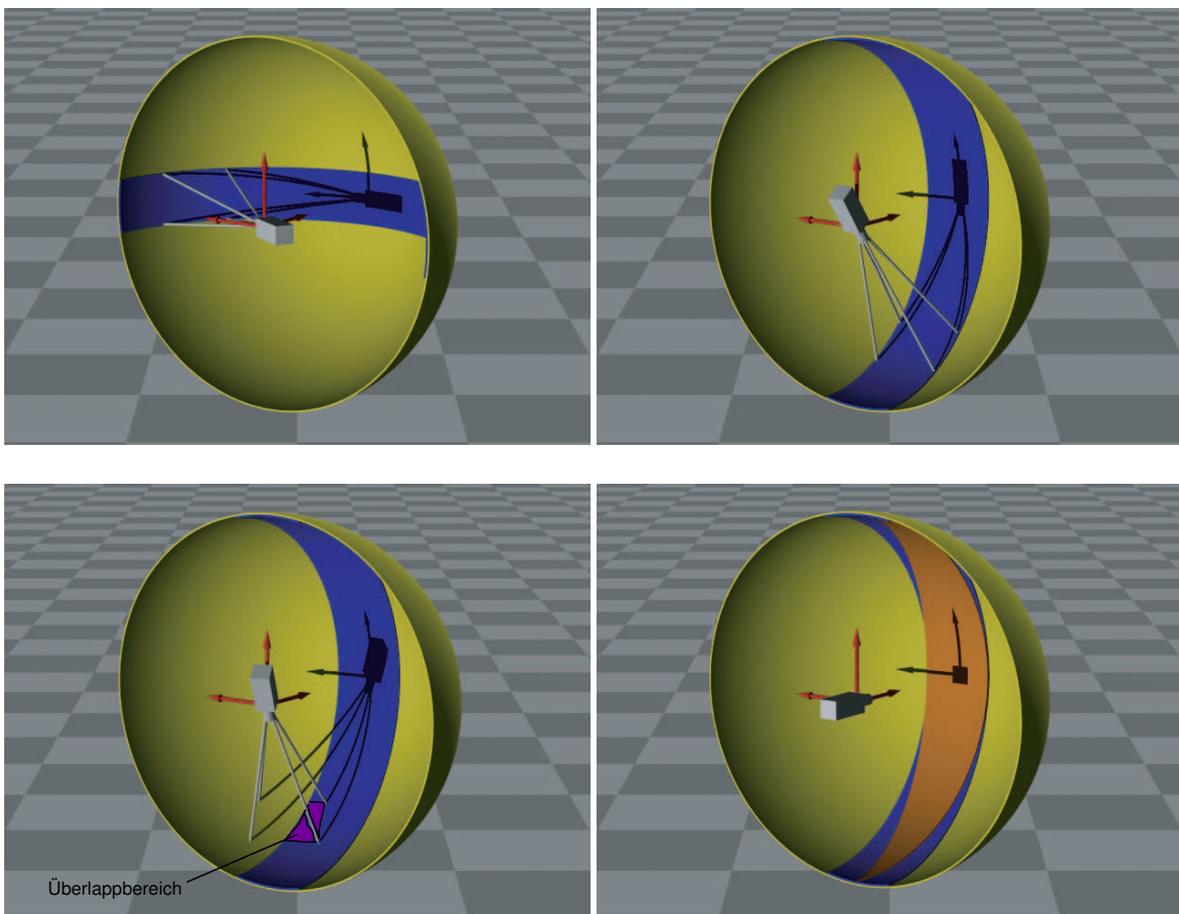


Abbildung 4.2: Geometrie der Kamera: (**oben**) Links: Horizontaler Schwenk, die Kamera sieht einen Streifen konstanter vertikaler Breite mit konstantem Azimutalöffnungswinkel $\Delta\phi = \beta_y$. Rechts: Vertikaler Schwenk, die Kamera sieht einen Streifen konstanter horizontaler Breite. Dieser Streifen hat in Äquatorhöhe einen Polaröffnungswinkel $\Delta\phi = \beta_x$, je weiter man sich dem Südpol nähert, desto größer wird $\Delta\phi$. (**unten**) Links: Bei polaren Rotationen überlappen sich horizontal benachbarte Raumwinkelbereiche zunehmend, je weiter sich der Sehstrahl den Polen nähert. Rechts: Um einen Überlapp benachbarter Raumwinkelpositionen zu verhindern, werden die Azimutalraumwinkelbereiche (blau) auf einen konstanten Polaröffnungswinkel $\Delta\phi = \beta_x$ eingegrenzt (orange.)

links). In der Äquatorialebene ist dieser Überlapp Null; er nimmt zu, je weiter sich die Kameraachse den Polen nähert und ist dort maximal: Eine polare Drehung der Kamera verschiebt dann den gesehenen Bildbereich nicht, sondern rotiert das Bild um den Pol.

Die Fusionierung überlappender Bereiche ist aufwendig, für die botanische Anwendung ist die Auflösung nicht entscheidend. Auf eine Fusionierung kann also verzichtet werden. Um einen Überlapp von benachbarten Raumwinkelbereichen zu verhindern, müssen die bei einem vertikalen Schwenk gesehenen Bildbereiche auf einen Polarwinkelbereich mit Breite $\Delta\phi = \beta_x$ begrenzt werden; vergleichbar den Segmenten einer Orange (Abbildung 4.2 unten rechts).

Der vertikale Raumwinkelstreifen sei aus Einzelraumbereichen zusammengesetzt die zueinander um $\Delta\theta = \beta_y$ rotiert sind (Abbildung 4.3). Bei Annahme kleiner Öffnungswinkel β_x, β_y kann der Verlauf der Überlappbereiche in einem Teilraumwinkelbereich in guter Näherung als linear angenommen werden. Dann ist der Verlauf der Begrenzungslinien in den Teilraumwinkelbereichen nur durch die Schnittpunkte des Polarwinkelbereichs mit den Teilraumwinkelober- und -unterkanten bestimmt. Die Begrenzungslinien verlaufen als Linien auf der Halbkugelschale.

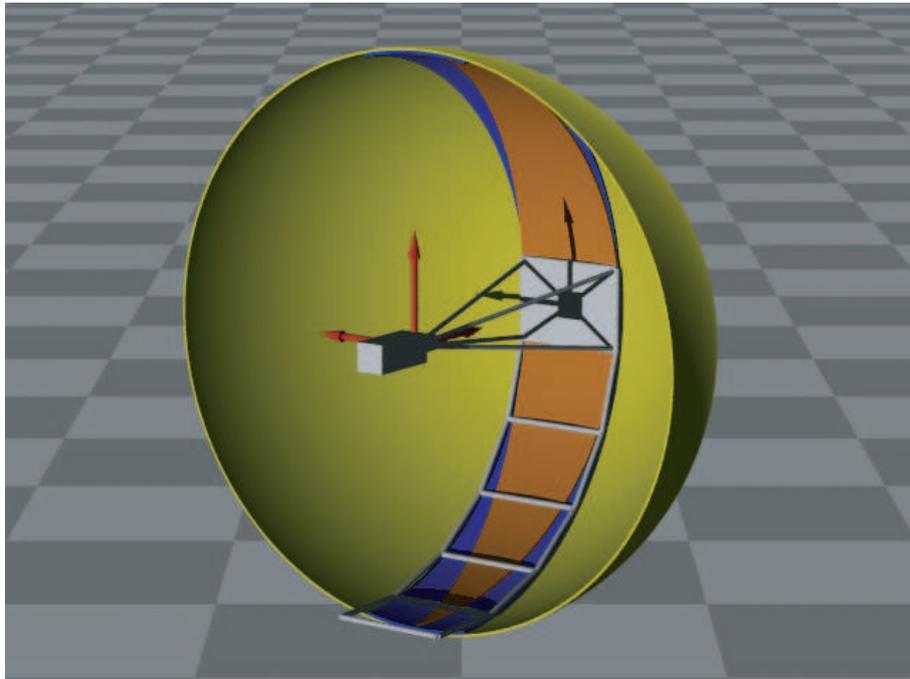


Abbildung 4.3: Teilbilder und Raumwinkelüberlapp: Die Begrenzung von Raumwinkelbereichen entspricht einer Beschränkung der Teilbilder auf eine entsprechende trapezförmige AOI. Die Bilder werden also auf die orangenen Bereiche begrenzt.

Da bei kleinen Öffnungswinkeln der Verlauf einer Struktur in zentralen Pixel-Koordinaten als proportional zu den entsprechenden zentralen lokalen Winkelkoordinaten angenommen werden kann, ist der Verlauf der Teilbereichsgrenzen im Tiefenbild in guter Näherung linear (Abbildung 4.7). Damit erscheint diese Raumwinkel-AOI (Area of Interest) in den Tiefenbildern als ein zur vertikalen Mittel-

achse symmetrisches Trapez. Die Form des Trapezes ist von den Öffnungswinkeln β_x, β_y und dem Azimutalwinkel θ abhängig: Im Äquatorialbereich ($\theta = 0^\circ$) hat das Trapez die gesamte Bildbreite und erscheint als Rechteck, an den Polen ($\theta = \pm 90^\circ$) läuft es in einem Punkt zusammen.

4.1.2 Berechnung von Raumwinkelüberlappungen

Die Raumwinkelbereiche von polar benachbarten Kamerapositionen überlappen einander, sofern sie nicht in der Äquatorialebene liegen. Betrachtet man die untere Hälfte der Halbkugelschale von oben, so erscheinen die seitlichen Begrenzungslinien der Raumwinkel-AOIs als zwei Geraden, die am Südpol zusammenlaufen (Abbildung 4.4). Die Schnittpunkte dieser radial verlaufenden Strecken mit Ober- und Unterkante der Tiefenbilder reichen zur Bestimmung der Raumwinkel-AOIs aus. Diese AOI-Eckpunkte sollen nun berechnet werden.

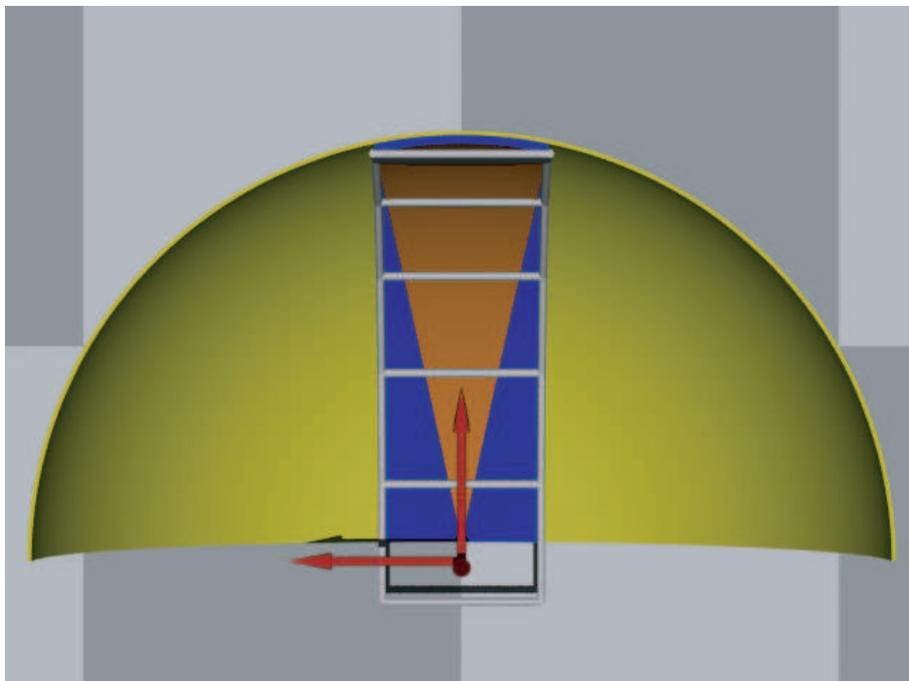


Abbildung 4.4: Berechnung des Raumwinkelüberlapps: Bei Betrachtung von oben erscheinen die auf der Kugelschale verlaufenden Äquipolarwinkellinien (d.h. die Ränder des orangen Bereichs) als radiale Strecken.

In der Projektion erscheinen die Teilbilder gestaucht: Sie sind umso weiter optisch verkürzt, je mehr sie sich der Äquatorlage nähern. Zur Berechnung dieser scheinbaren Längen hilft die Seitenansicht der in Abbildung 4.4 skizzierten Viertelkugel (Abbildung 4.5). Zur Vereinfachung der folgenden Überlegungen werden virtuelle 3D-Pixelkoordinaten (x', y', z') eingeführt: Die Pixelpositionen in den einzelnen Teilbildern werden als Raumwinkel interpretiert, die einzelnen Teilbilder sind zueinander um $\Delta\theta = \beta_y$ rotiert.

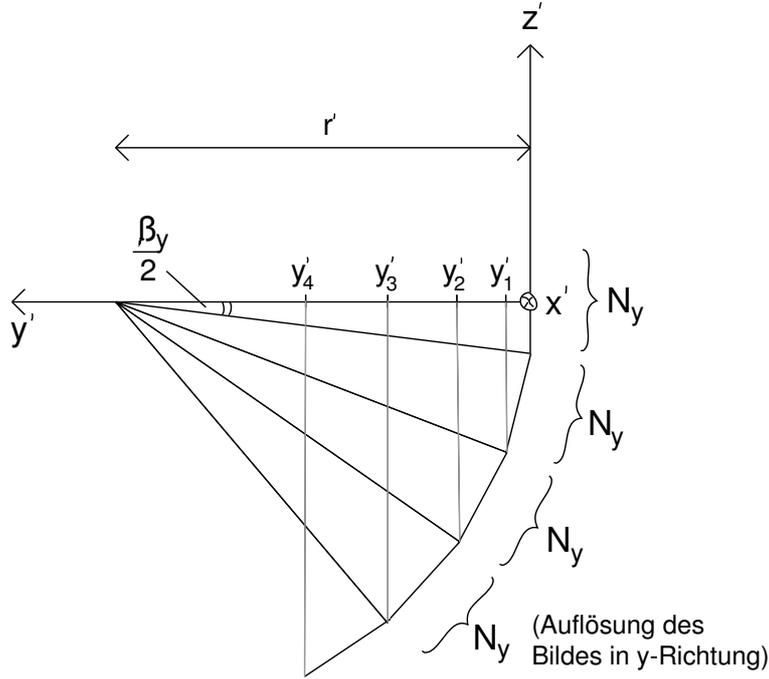


Abbildung 4.5: Übergang in Pixelkoordinaten: Skizziert ist die Seitansicht des in Abbildung 4.5 gezeigten Raumwinkelbereichs.

Die Bilder seien so angeordnet, dass die Mitte des obersten Bildes in der Äquatorebene liegt. In der Projektion von oben erscheint es dann als Linie: Die Raumwinkel-AOI umfasst das ganze Bild. Die Teilbilder werden bei Null beginnend mit i indiziert, das Bild in Äquatorhöhe hat den Index Null. Zur Berechnung der AOI-Eckpunkte folgert man aus Abbildung 4.5:

$$\sin(i\beta_y) = \frac{\Delta y'_i}{N_y} \quad \text{und} \quad y'_i = \sum_{j=1}^i \Delta y'_j$$

wobei $\Delta y'_i = y'_i - y'_{i-1}$, N_y ist die Auflösung der Tiefenbilder in y -Richtung. Damit folgt für die y' -Position der AOI-Eckpunkte im i -ten Teilbild:

$$y'_{i,AOI} = \sum_{j=0}^i N_y \sin(j\beta_y) \quad (4.1)$$

Betrachtet man die Grundrissprojektion in Pixelkoordinaten (Abbildung 4.6), so folgt für den Verlauf der Gerade auf der die AOI-Eckpunkte liegen:

$$x'_{i,AOI} = \pm \frac{N_x}{2r} y'_{i,AOI} \mp \frac{N_x}{2} \quad (4.2)$$

Dabei ist r' der Radius der Raumwinkelschale in Pixelkoordinaten. Mit $\frac{\beta_y}{N_x} = \frac{360^\circ}{2\pi r'}$ ergibt sich für die Lage der AOI-Eckpunkte in zentralen Pixelkoordinaten:

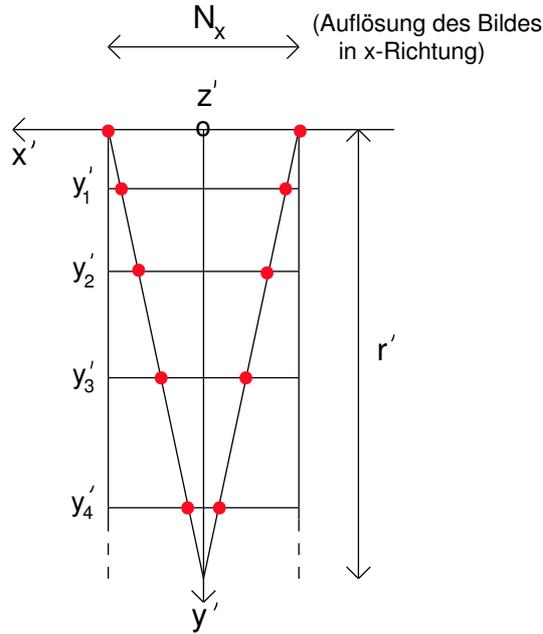


Abbildung 4.6: Berechnung der Teilbild-AOI: Entsprechend der Ansicht in Abbildung 4.5 kann der Verlauf der seitlichen AOI-Begrenzungen in den Teilbildern berechnet werden.

$$x'_{i,AOI} = -\frac{\pi\beta_y}{360^\circ} \sum_{j=0}^i \sin(j\beta_y) + \frac{N_x}{2} \quad (4.3)$$

Für den Verlauf der AOI-Ränder in einem der Teilbilder folgt dann:

$$x_{i,AOI-Rand}(y) = \pm \frac{x'_{i,AOI} - x'_{i-1,AOI}}{N_y} y \pm x'_{i-1,AOI} \quad (4.4)$$

Damit steht der Verlauf der Raumwinkel-AOI in den einzelnen Teilbildern fest. Die Form der AOI hängt von Bildauflösung, Öffnungswinkel und Azimutalposition der Kamera ab.

4.2 Koordinatentransformationen

Um eine möglichst einfache Weiterverarbeitung der Gesamtoberflächendaten zu ermöglichen erscheint das Vorliegen dieser in globalen kartesischen Koordinaten sinnvoll. Als Ursprung des Koordinatensystems bietet sich dabei die als fix angenommene Position des Sensors an, da alle Tiefendaten des Stereoverfahrens relativ zu dieser berechnet werden. Dabei seien die Teiltiefenbilder auf die jeweilige Raumwinkel-AOI beschränkt; das heißt benachbarte Tiefenbilder überlappen einander nicht.

Aufgrund der durch die Kamerarotationen gegebenen Symmetrie der Teilrekonstruktionspositionen ist aber zunächst eine Umrechnung in globale Kugelkoordinaten angebracht. Dafür ist eine Reihe von Koordinatentransformationen notwendig. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

4.2.1 Lokale kartesische Koordinaten

Eine Stereorekonstruktion mit dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Verfahren liefert für jedes Bildpixel eine Tiefe Z in Weltkoordinaten. Zur Kenntnis der räumlichen Lage solch einer Teilrekonstruktion ist aber auch die XY-Position der Oberflächenpunkte in Weltkoordinaten notwendig.

Die Umrechnung der Pixel- in Weltkoordinaten erfolgt nach der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methode: Die scheinbare Größenänderung im Bild durch unterschiedliche Entfernung der Oberflächenpunkte von der Kamera wird durch eine pixel-spezifische lineare Streckung bzw. Stauchung aufgehoben. Dieser Zusammenhang wird durch (3.18) mathematisch beschrieben. Die Oberflächenkoordinaten liegen dann in lokalen kartesischen XYZ-Koordinaten vor. Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt am Ort des Sensors, die XY-Richtungen werden durch die Sensorachsen vorgegeben, die Z-Achse zeigt in Richtung der optischen Achse.

4.2.2 Lokale Kugelkoordinaten

Die sphärische Symmetrie der Teilrekonstruktionen spricht für die Verwendung von Kugelkoordinaten. Die Z-Achsen der Teilrekonstruktionen sind um feste Winkel β_x, β_y gegeneinander rotiert. Diese Rotationswinkel entsprechen den Polar- und Azimutalwinkeln ϕ, θ in Kugelkoordinaten.

Für jede Teilrekonstruktion wird zunächst deren Verlauf in lokalen Kugelkoordinaten berechnet. Diese seien wie folgt definiert: Relativ zur Bildmitte werden die xy-Pixelkoordinaten als lokale Winkel ϕ_l und θ_l angegeben (Abbildung 4.7).

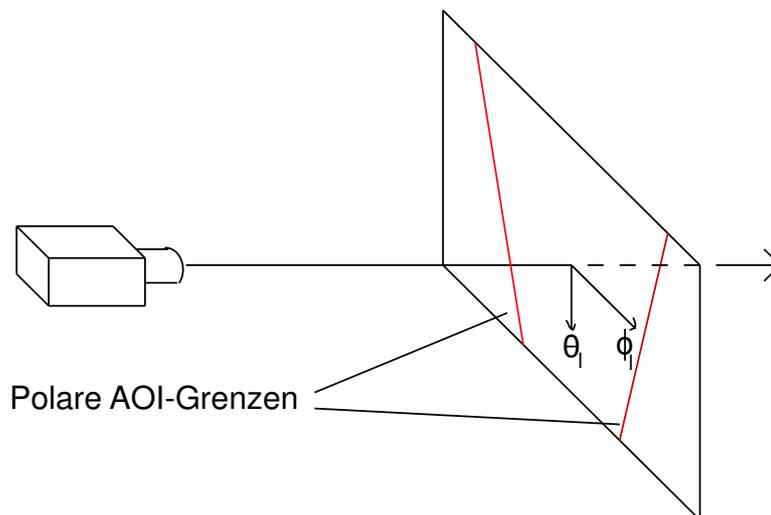


Abbildung 4.7: Transformation in lokale Kugelkoordinaten: Relativ zur Bildmitte werden die xy-Pixelpositionen innerhalb eines Teilbildes vertikal in lokale Azimutalwinkel θ_l , horizontal in lokale Polarwinkel ϕ_l umgezeichnet.

Aus der Überlappkorrektur (vergleiche Kapitel 4.1) ist bekannt, welche horizontale Pixelposition einem relativen Polarwinkel der Größe $\frac{\beta_x}{2}$ entspricht: Dies sind die linke und rechte Seite der Überlapp-AOI. Bei Annahme des Lochkameramodells kann der Polarwinkel für die Pixelpositionen

dazwischen linearisiert werden. Eine entsprechende Linearisierung wird zur Berechnung des lokalen Azimutalwinkels θ_l durchgeführt: Hier ist bekannt, dass die Ober- bzw. Unterkante des Bildes den Öffnungswinkel $-\frac{\beta_y}{2}$ bzw. $\frac{\beta_y}{2}$ hat. Der Radius R als noch fehlende Koordinate wird über den Abstand der Oberflächenpunkte bestimmt. Für die Berechnung der lokalen Kugelkoordinaten folgt also:

$$\begin{aligned} R_l(x, y) &= \sqrt{X_l(x, y)^2 + Y_l(x, y)^2 + Z_l(x, y)^2} \\ \theta_l(y) &= \beta_y \left(\frac{y}{N_y} - \frac{1}{2} \right) \\ \phi_l(x) &= \beta_x \left(\frac{x}{2x_{i, AOI-Rand}} \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Dabei ist $x_{i, AOI-Rand}$ der in (4.4) angegebene Ausdruck, d.h. der linke und rechte Rand der Raumwinkel-AOI.

4.2.3 Globale Kugelkoordinaten

Die Oberflächendaten liegen nun in einer Reihe von Teilrekonstruktionen vor, in denen die Lage der gesehenen Oberflächenpunkte in lokalen Kugelkoordinaten R, ϕ_l, θ_l charakterisiert wird. Die Lage dieser lokalen Koordinatensysteme zueinander ist aber bekannt: Sie sind jeweils um Polar- und Azimutalwinkel β_x und β_y rotiert. Deshalb können die lokalen Kugelkoordinaten ϕ_l, θ_l additiv in globale Kugelkoordinaten ϕ, θ umgerechnet werden. Die Radialkomponente wird direkt übernommen. Für die globalen Kugelkoordinaten gilt also:

$$\begin{aligned} R &= R_l \\ \theta &= \theta_l + i\beta_y + 90^\circ \\ \phi &= \phi_l + j\beta_x \end{aligned} \quad (4.6)$$

Dabei indiziert i die relative Azimutalposition der Teilbilder zum Äquator; j die relative Lage zur Polarposition mit $\phi = 0$.

4.2.4 Globale kartesische Koordinaten

Über die Festlegung der Polarlage $\phi = 0$ wird auch die Lage der x- und y-Achsen des globalen kartesischen Koordinatensystems festgelegt: Die x-Achse der globalen Koordinaten zeigt in Richtung des Polarwinkels $\phi = 0$ und liegt in der Äquatorialebene ($\theta = 0$). Für die Berechnung der kartesischen Koordinaten aus den Kugelkoordinaten gilt:

$$\begin{aligned} X &= R \sin \theta \cos \phi \\ Y &= R \sin \theta \sin \phi \\ Z &= R \cos \theta \end{aligned} \quad (4.7)$$

Damit liegt die in einem weiten Raumwinkelbereich gesehene Oberfläche in globalen kartesischen Koordinaten vor.

4.3 Zusammenfassung

Es wurde eine Methode zur Rekonstruktion von Oberflächen vorgestellt, die einen weiten Raumwinkelbereich umfassen. Dabei wird die Überlappung von Teilraumwinkelbereichen berechnet und die Teilrekonstruktionen auf diese Raumwinkel-AOIs begrenzt. Die Lage der Raumwinkel-AOI in den Teiltiefenbildern hängt nur von Kameraöffnungswinkel, Bildauflösung und Azimutallage der jeweiligen Kameraposition ab. Diese überlappfreien Teilrekonstruktionen durchlaufen eine Serie von Koordinatentransformationen, um deren lokale Lage in eine Globale umzurechnen; dabei macht man sich die sphärische Symmetrie der Kamerapositionen zunutze. Die Oberflächenkoordinaten liegen schließlich in kartesischen Koordinaten relativ zum Ort der Kamera vor.

Kapitel 5

Bekannte Verfahren

Mit den entwickelten Verfahren können der 3D-Verlauf und die Geschwindigkeitsfelder von Oberflächen sowie deren Verformung berechnet werden. Alle Pflanzen und deren Organe wachsen in drei Dimensionen. Für Spezialfälle wie Wurzeln oder Blätter kann ein vereinfachtes Wachstumsmodell in einer bzw. zwei Dimensionen angenommen werden: Wurzeln haben nicht nur eine ausgeprägte lineare Struktur, auch ihr Wachstum ist in guter Näherung linear. Der Durchmesser der zylindrisch aufgebauten Wurzel ändert sich nicht, während sie wächst, Wurzelwachstum ist deshalb in erster Näherung ein eindimensionaler Prozess. Im Falle von wachsenden Blättern lässt sich ebenfalls ein vereinfachtes Modell annehmen: Die Dicke des Blattes ändert sich über längere Zeiträume kaum, deshalb kann das Wachstumsmodell auf zwei Dimensionen beschränkt werden.

Für eine große Zahl von pflanzlichen Organen und Strukturen können sinnvolle Aussagen zum Wuchsverhalten nur gemacht werden wenn die Änderung der dreidimensionalen Form untersucht wird. Im Falle von Früchten, Stämmen oder Kronendächern können die oben vorgestellten Reduzierungen auf niederdimensionales Verhalten nicht gemacht werden. Der Skalenbereich der potentiellen Untersuchungsobjekte reicht dabei von Pflanzenwurzeln im Millimeter-Bereich [6][10][44][86][88], über Blätter [15][76][77][72][93] bis zu Kronendächern ganzer Baumpopulationen [9][56][69][47][48], deren Ausdehnung kann bei vielen Metern liegen.

In der botanischen Anwendung erscheinen zwei Einsatzmöglichkeiten der neuen Methoden als sinnvoll: Die Berechnung von Flächenwuchsraten auf Pflanzenorganen wie Blättern oder Früchten und die Rekonstruktion ausgedehnter Kronendächer. Im Folgenden wird beschrieben, wie die neu entwickelten in bestehende Methoden einzuordnen sind. Dabei werden sowohl manuelle als auch Bildverarbeitungsverfahren vorgestellt.

5.1 Methoden zur Wachstumsanalyse

Wachstum ist ein Indikator für eine Vielzahl von physiologischen Prozessen innerhalb der Pflanze und damit eine wichtige botanische Beobachtungsgröße. Neben den konventionellen manuellen Methoden werden mittlerweile vermehrt Bildverarbeitungssysteme eingesetzt. Unter den untersuchten Pflanzenorganen sind z.B. Wurzeln oder Blätter, bei beiden hat die Untersuchung mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden zu einer erheblichen Steigerung der zeitlichen und räumlichen Auflösung geführt.

5.1.1 Manuelle Wachstumsuntersuchungen

Systematische Untersuchungen zum Wuchsverhalten wurden vor allem an Wurzeln und Blättern gemacht. Da Wurzeln quasi eindimensionales Längenwachstum zeigen, sind sie besonders leicht zu untersuchen. Um ihr Wachstum zu messen, werden meist manuell die Distanzen von künstlich angebrachten Markierungen bestimmt [6][17][10]. Diese Markierungen werden entweder auf einem fixen Hintergrund, vor dem die Wurzel wächst, oder auf der Wurzel selbst angebracht (Abbildung 5.1). Im ersten Fall wird zu festen Zeitpunkten die Position der Wurzelspitze auf dem Hintergrund markiert. Falls die Markierungen auf der Wurzel selbst angebracht wurden, kann aus der Änderung der Abstände ein grob aufgelöstes Wachstumsprofil entlang der Wurzel erstellt werden [16][78].



Abbildung 5.1: Manuelle Wachstumsmessung an Wurzeln [91]: (*links*) Zu bestimmten Zeiten werden die Spitzenpositionen der Wurzeln markiert. Es handelt sich um Maiswurzeln. (*rechts*) Alternative manuelle Methode: Marker auf der Wurzel (Mais) entfernen sich im Laufe der Zeit zunehmend voneinander. Aus der Änderung der Abstände kann die Wachstumsrate lokal berechnet werden.

Wachstumsmessungen an Blättern umfassen die Untersuchung von Blattaderlängen [15][76][77] und von Flächenänderungen. Die Länge von Hauptadern kann z.B. einfach mit Linealen bestimmt werden, technisch aufwendigere Methoden messen Längenänderungen über an den Blättern befestigte Fäden und deren Positionsänderungen. Um eine räumliche Auflösung des Längenzuwachses zu erreichen, können entlang der Mittelrippe des untersuchten Blattes Markierungen angebracht werden. Typischerweise wird die Blattlänge in vier oder fünf Abschnitte unterteilt.

Zur Bestimmung der Flächen von Blättern werden unterschiedliche Verfahren verwendet. Für viele Spezies kann über einen charakteristischen Formfaktor ein Zusammenhang zwischen Länge und Breite des Blattes und dessen Fläche hergestellt werden, durch Messung von einer Distanz kann also auf die Fläche hochgerechnet werden. Die Blattfläche kann auch direkt bestimmt werden, kommerziell erhältliche Geräte erlauben das Einscannen von abgetrennten Blättern, diese durchlaufen auf einem Fließband den Messbereich. Durch den Einsatz einfacher Bildverarbeitung kann die Fläche von Blattbereichen manuell gemessen werden [85]. Diese Methodik kann auf einzelne Teilbereiche angewandt werden [53][54][27], der Arbeitsaufwand steigt allerdings deutlich an (Abbildung 5.2).

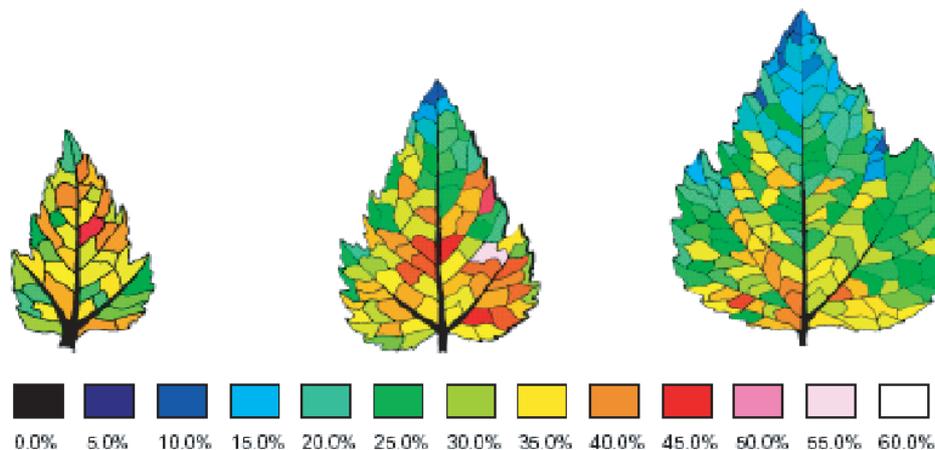


Abbildung 5.2: Manuelle Wachstumsratenbestimmung an Blättern: Die Flächenänderung der Teilflächen liefert die relative Wachsrates in den Teilregionen. Die Wachsrates sind in % pro Tag angegeben [54].

5.1.2 Wachstumsuntersuchungen mit digitaler Bildverarbeitung

Der experimentelle Aufwand der manuellen Methoden ist beträchtlich, außerdem ist die zeitliche und örtliche Auflösung sehr begrenzt. Um diese Einschränkungen zu umgehen, können Verfahren der digitalen Bildverarbeitung benutzt werden.

Da die Wachsrates über die Divergenz des Bewegungsvektorfeldes bestimmt werden kann (vergleiche Kapitel 3.1.1), sind also Verfahren gefragt, die das Geschwindigkeitsvektorfeld von Oberflächen bestimmen können. Verfahren zur Bestimmung des optischen Flusses können dieses Vektorfeld berechnen, allerdings stimmen optischer Fluss und Bewegungsvektorfeld nur für fronto-parallele Flächen in konstanter Tiefe überein. D.h. die Oberflächen der Untersuchungsobjekte müssen eben sein und in festem Abstand senkrecht zur Kameraachse liegen. Da Blätter sich im Allgemeinen während eines Tagesganges bewegen, müssen sie für Langzeituntersuchungen fixiert werden.

2D-Verfahren

Zur Bestimmung des optischen Flusses wurde bei wachsenden Wurzeln [88][86] und Blättern [72][93] mit Erfolg das Strukturtenorverfahren verwendet (vergleiche Kapitel 2.1). Bei geschickter Beleuchtung erscheint die Wurzeloberfläche im Allgemeinen kontrastreich genug, um ein ausreichend dichtes Bewegungsfeld bestimmen zu können. Aus dessen Divergenz wird die relative Wachsrates berechnet (Abbildung 3.2). Um Langzeitaufnahmen zu ermöglichen, ist die Kamera auf ein System von Verschiebetischen montiert, das der Wurzelspitze hinterher fährt (Abbildung 5.3).

Bei Blättern ist die natürliche Oberflächenstruktur zum Teil sehr ausgeprägt (z.B. Rizinusblätter), andere Spezies weisen außer den Hauptadern kaum deutliche Strukturen auf (z.B. Tabak). Hier können über die Sprühmarkermethode zusätzliche Kontrastmarkierungen aufgebracht werden (vergleiche Anhang C). Besonders bei Blättern gestaltet sich die für die korrekte Berechnung der Wachsrates notwendige fronto-parallele Fixierung als schwierig. Trotz Fixierung der Blattspitzen mit Hilfe von kleinen Gewichten besitzt das Blatt noch genug Eigendynamik, um unter Umständen zu Artefakten in

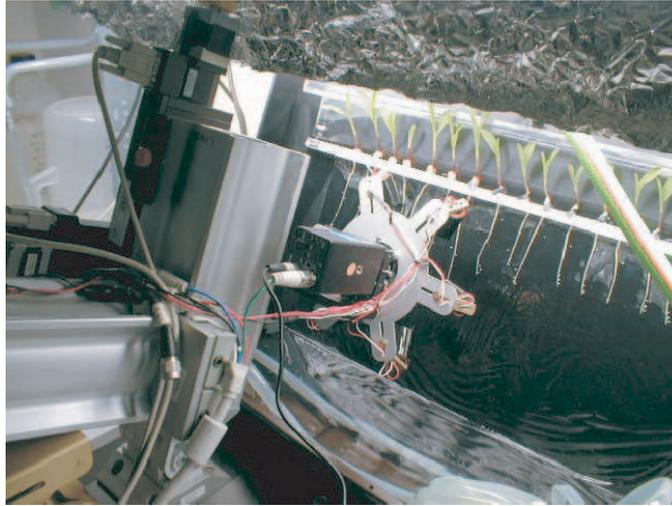


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau für Wachstumsmessungen an Maiswurzeln mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden. Die Wurzeln wachsen auf einer schrägen Kunststoffplatte. Die Kamera mit der die Bildsequenzen aufgenommen werden ist auf einen Verschiebetisch montiert. Dieser führt die Kamera der Wurzelspitze nach, bevor sie aus dem Bildbereich wächst.

den Messungen zu führen (Abbildung 5.4).

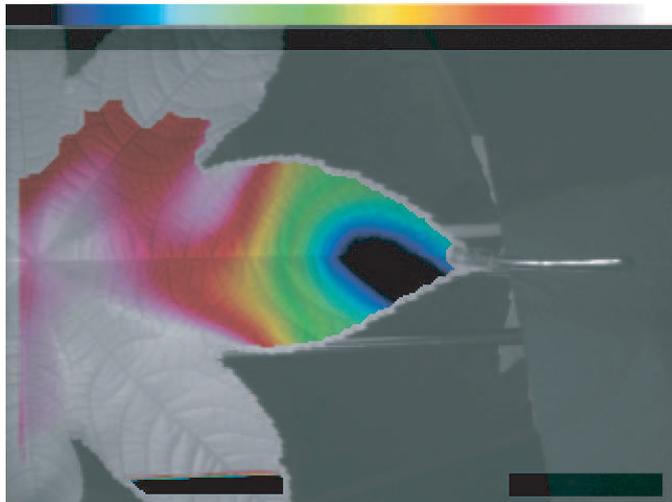


Abbildung 5.4: Ergebnis der 2D-Wuchsanalyse für ein Ricinusblatt [72]. Dem Originalbild ist die relative Wuchsrate farblich kodiert überlagert. In der abgebildeten Farbskala steigt die Wuchsrate nach rechts an, grün steht für Null. Die Blattspitze bewegt sich im Verlauf der Messung von der Kamera weg und scheint deshalb zu schrumpfen (negative Wuchsrate). Vertikale Blattbewegungen machen sich stark im Auswertungsergebnis bemerkbar.

3D-Verfahren

Aus dem oben genannten Grund erscheint der Einsatz von 3D-Methoden sinnvoll. Es wurden Versuche gemacht, bei denen Laserscanner und Streifenlichtprojektoren zum Einsatz kamen (Abbildung 5.5). Mit beiden Verfahren kann die räumliche Lage der Oberfläche bestimmt werden [79]. Diese Tiefendaten werden mit den Bewegungsfelddaten aus dem 2D-Strukturtensoverfahren gekoppelt. Auf diese Weise kann die Bewegung von Pflanzen untersucht werden, für eine zuverlässige Bestimmung von Wuchsraten reicht die Genauigkeit der Methoden jedoch nicht aus. Das vorgestellte Verfahren schließt diese Lücke.

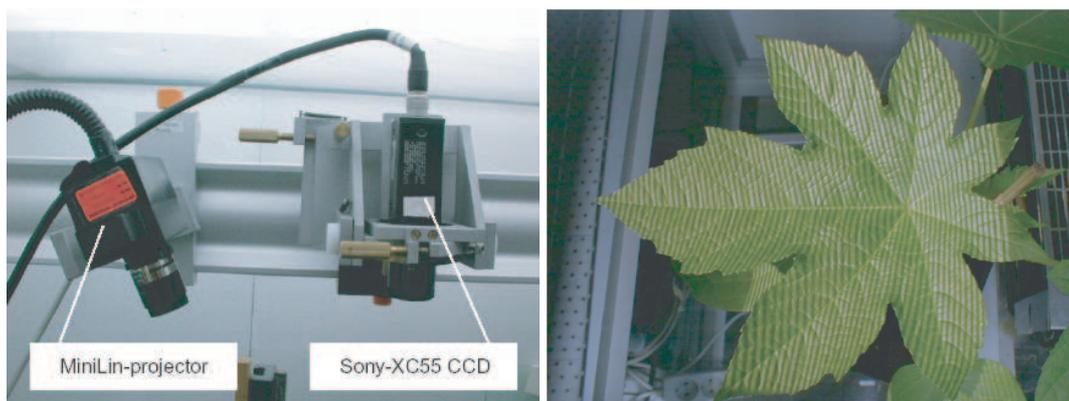


Abbildung 5.5: Versuchsaufbau zur 3D-Vermessung von Pflanzenblättern [79]: Mittels eines Streifenlichtprojektors werden Linienmuster auf das von der Kamera aufgenommene Blatt projiziert.

5.2 Verfahren zur Kronendachvermessung

Die Bestimmung von Kronendachverläufen ist für mehr als eine Zielgruppe interessant: Botaniker sind an den zugrundeliegenden Prozessen interessiert, Forstwirtschaftler an Abschätzungen von Nutzholzvolumen.

Unter einem Kronendach versteht man die Gesamtheit der Blätter, Zweige und kleinen Äste von Bäumen [63]. Die Struktur von Kronendächern ist die zeitliche und räumliche Organisation dieser Komponenten [61]. Die Struktur eines Kronendaches kann auf mehreren räumlichen und zeitlichen Skalen beschrieben werden [28]: Von den Orientierungsänderungen einzelner Blätter im Laufe eines Tages bis zu Variationen von ganzen Waldbeständen innerhalb vieler Jahre. Abhängig von der biologischen Fragestellung müssen also Messungen auf unterschiedlichen Skalen gemacht werden.

Man unterscheidet im Allgemeinen zwischen direkten und indirekten Methoden [11]: Bei direkten Methoden wird tatsächlich physikalischer Kontakt zu Komponenten des Kronendaches aufgenommen. Indirekte Methoden sammeln Strahlung die Elemente des Kronendaches durchläuft oder von ihnen reflektiert wird. Direkte Methoden beinhalten langwierige und aufwendige Feldmessungen, die gemessenen Werte lassen sich aber meist leicht auswerten. Indirekte Methoden können in kurzer Zeit große Datenmengen sammeln, um aber sinnvolle Aussagen zu treffen, müssen die Daten üblicherweise reduziert und aufwendig weiterverarbeitet werden.

5.2.1 Manuelle Kronendachuntersuchungen

Die einfachste Möglichkeit zur Vermessung von Kronendachelementen sind Messungen von Hand [3][69][47][48]: Mittels Linealen, Massbändern und Kompassen (Abbildung 5.6). Problematisch kann der Zugang zu den Kronendächern sein: Falls die untersuchten Bäume höher als einige Meter sind, müssen spezielle Techniken benutzt werden, um deren Spitze zu erreichen [55][52].



Abbildung 5.6: Manuelle Kronendachuntersuchungen: (*links*) Kompass mit Winkelmesser zur Neigungsmessung von Blättern. (*mitte*) Portabler Blattflächenmesser (Firma LICOR). (*rechts*) Densiometer.

Klettertechniken basieren auf Leitern oder Seilen, die genutzt werden, um Bäume zu besteigen (Abbildung 5.7). Diese Methoden sind vergleichsweise billig, aber zeitaufwendig, erfordern spezielle Qualifikationen und sind räumlich begrenzt. Andere Methoden zum Erreichen der Kronendachbereiche nutzen Brücken zwischen Bäumen [57], per Ballon abgesetzte Plattformen [31] oder Baukräne [64]. All diese Methoden sind teuer und arbeitsaufwendig.



Abbildung 5.7: Zugang zu Kronendächern: (*links*) Besteigung eines Baumes mit Einseiltechnik. (*mitte*) Kronendachzugang mit Kran. (*rechts*) Absetzen einer Messplattform per Ballon.

5.2.2 Kronendachvermessung mit Bildverarbeitungsmethoden

Bei der Verwendung von indirekten Methoden kann das Zugangsproblem umgangen werden: Die Messungen werden vom Boden oder aus der Luft vorgenommen. Herkömmliche indirekte Methoden basieren auf der Benutzung der Augen: Densiometer vergleichen die vom Kronendach absorbierte mit der transmittierten Lichtmenge, andere Methoden verwenden z.B. die Zahl von Lichtflecken auf

Waldböden. Technisch komplexere Ansätze zur Fernerkundung benutzen Bildverarbeitungsmethoden zur Datenaufnahme und -auswertung.

Stereo-Photogrammetrie erlaubt die Höhenrekonstruktion von Kronendächern aus Paaren von Luftaufnahmen [36]: Durch Bestimmung der Disparität kann ein Höhenprofil der beobachteten Bereiche erstellt werden. Luftaufnahmen werden normalerweise aus großen Höhen aufgenommen, so decken sie eine große Fläche ab. Die zugehörigen 3D-Rekonstruktionen sind jedoch nicht sehr detailliert, die Auflösung liegt meist bei einigen Metern. Das Verfahren wird deshalb vor allem für topographische Zwecke verwendet.

Höhenmessungen mit dem Lidar-Verfahren (*Light detecting and ranging*) erlauben ebenfalls die Bestimmung räumlicher Information [2] [9] [56]: Ein Laserpuls wird in verschiedenen Höhen von Teilen der Pflanze oder dem Boden reflektiert (Abbildung 5.8). Aus dem Zeitunterschied und den Wellenformen der verschiedenen Reflektionssignale sowie einer angemessenen Energietransferfunktion kann auf die vertikale Struktur von Kronendachelementen geschlossen werden [96][60][49].

Die Erhebung von Lidar- bzw. photogrammetrischen Daten ist teuer: Beide Methoden werden von Flugzeugen aus angewandt. Da Lidar-Messungen nur einen kleinen Winkel abdecken können, muss für die Rekonstruktion größerer Bereiche eine Reihe von Flügen absolviert werden. Damit wird ein weiterer Nachteil der Luftbild- bzw. Lidar-gestützten Verfahren deutlich: Sie lassen nur vertikale Oberflächenrekonstruktionen zu. Die Aufnahmen bzw. Messungen werden von oben gemacht. Das neu entwickelte Verfahren kann zusätzlich seitliche oder Ansichten von unten rekonstruieren.

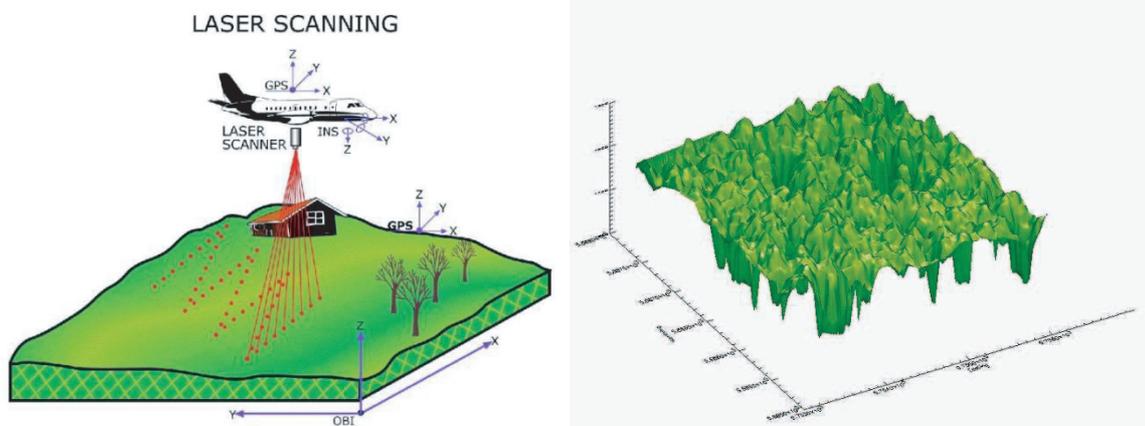


Abbildung 5.8: Kronendachuntersuchungen mit Lidar-System: (*links*) Schematisch: Ein Flugzeug mit Laser-scanner überfliegt ein Gebiet, die Entfernung zum Boden wird aus Signallaufzeiten berechnet. (*rechts*) Visualisierung typischer Lidar Höhendaten: Einzelne Bäume lassen sich erkennen.

5.3 Zusammenfassung

Sowohl für Wachstumsuntersuchungen als auch zur Rekonstruktion von Kronendächern stehen eine Reihe von Messtechniken zur Verfügung. Diese umfassen zum einen manuelle Methoden, zum anderen Techniken, bei denen Bildverarbeitung angewandt wird.

Bei Wachstumsmessungen sind manuelle Techniken üblicherweise arbeitsintensiv und bieten eine geringe räumliche bzw. zeitliche Auflösung. Bildverarbeitungsmethoden haben hier zu einer deutlichen Steigerung der Messgenauigkeiten geführt. Die botanisch relevanteste Größe, die relative Wachstumsrate, kann im Fall einer fronto-parallelen Orientierung der Untersuchungsobjekte mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Bei der Untersuchung von Blättern ist eine Fixierung dieser in einer Ebene erforderlich. Wachstumsraten von gewölbten Oberflächen, wie sie z.B. bei Früchten oder frei beweglichen Blättern vorkommen, können nicht korrekt bestimmt werden. 3D-Rekonstruktionsverfahren, die auf Laserscannern oder Streifenlichtprojektoren basieren können, die Lage der Oberflächen im Raum bestimmen, sie sind aber nicht genau genug, um Wachstumsratenverläufe zu bestimmen. Das vorgestellte 3D-Verfahren schließt diese Lücke.

Kronendachrekonstruktionen werden ebenfalls mit direkten (manuellen) und indirekten (remote sensing) Verfahren durchgeführt. Auch hier sind die direkten Methoden aufwendig. Indirekte Methoden werden üblicherweise auf großen Skalen angewandt, die Messungen selbst werden von Flugzeugen aus durchgeführt. Die Auflösung der erhaltenen 3D-Profilen ist im Fall von Lidar-Daten relativ hoch. Hier erweitert das vorgestellte 3D-Rekonstruktionsverfahren die Messmöglichkeiten: Es liefert noch deutlich höhere Auflösungen. Außerdem müssen die Aufnahmen nicht von Flugzeugen aus gemacht werden, womit seitliche Einsichten in das Kronendach möglich werden.

Teil II

Experimente

Kapitel 6

Experimentelle Aufbauten

Dieses Kapitel beschreibt die experimentelle Umsetzung der entwickelten Methoden zur 3D-Vermessung von Pflanzenoberflächen. Dargestellt werden zwei Aufbauten: Der erste dient zur Aufnahme von Bildsequenzen, anhand derer die Wachsraten von Pflanzenorganen berechnet werden. Der zweite Aufbau ermöglicht Aufnahmen zur Zusammensetzung ausgedehnter Oberflächen aus Einzelrekonstruktionen. Die verwendeten Geräte werden vorgestellt, die Strukturierung der Auswerteprogramme gezeigt und Kalibrierungsmethoden vorgeschlagen (vergleiche Anhang D).

6.1 Aufbau zur Bestimmung von Wachsraten

Die Tiefeninformation der Bildsequenzen wird mit einem Near-Baseline-Stereoverfahren bestimmt (vergleiche Kapitel 2.2), d.h. der Abstand der Kamerapositionen muss klein sein im Vergleich zum Abstand von Kamera und Objekt. Die Ausdehnung wachsender Pflanzenorgane wie Blätter oder Früchte liegt meist im Bereich einiger Zentimeter. Bei Verwendung von 25mm-Objektiven beträgt die typische Kamera-Objekt-Entfernung etwa 50 cm. Bei Annahme eines 1:100-Verhältnisses von Kamerapositions- zu Kamera-Objekt-Abstand sollten die Kamerapositionen also etwa 5 mm voneinander entfernt sein. Dies liegt unter den Abmessungen üblicher Kameragehäuse.

6.1.1 Geräte und Aufbau

Zur Umsetzung von nah benachbarten Kamerapositionen werden ein Linearverschiebetisch und eine darauf montierte Kamera benutzt: Der rechnergesteuerte Schrittmotorverschiebetisch (OWIS, Staufen, Modell VTM80) fährt nacheinander die verschiedenen Kamerapositionen an. Die Genauigkeit der Tischpositionen liegt im Mikrometerbereich. Zwischen den Aufnahmen an den unterschiedlichen Positionen liegt zwar eine gewisse Zeit (typischerweise im Sekundenbereich), diese ist aber vernachlässigbar klein gegenüber der Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Aufnahmeserien, die typischerweise im Bereich einiger Minuten liegt.

Die Objekte im Bild sollten sich nicht abrupt bewegen: Tiefen- und Bewegungsinformation werden mit dem Strukturtensoverfahren berechnet (vergleiche Kapitel 2). Da dieses nur Verschiebungen in der Größenordnung eines Pixels berechnen kann, führen große Objektbewegungen zu Lücken

in der Auswertung. Deshalb wurden Verschiebetisch und Kamera auf einen stabilen Trägeraufbau (X95-System, Spindler & Hoyer) montiert (Abbildung 6.1). Die für alle Aufnahmen verwendete CCD-Kamera (XC75, Sony) liefert zusammen mit dem Framegrabber (PCEYE4, Eltec, Mainz) ein Schwarzweißbild mit der Auflösung 480×640 Pixel, die möglichen Grauwerte liegen zwischen Null (schwarz) und 255 (weiß). Ein 25mm-Objektiv (Cosmicar/Pentax) wurde wegen der gewünschten Verzerrungsarmut gewählt. Der serienmäßig eingebaute Infrarotfilter wurde entfernt, da die Pflanzen mit einem Feld aus Infrarotdioden ($\lambda = 940$ nm, Conrad Elektronik) beleuchtet werden. Dies erscheint sinnvoll, eine Beleuchtung mit sichtbarem Licht hätte Einfluss auf das Wachstumsverhalten der Pflanzen.

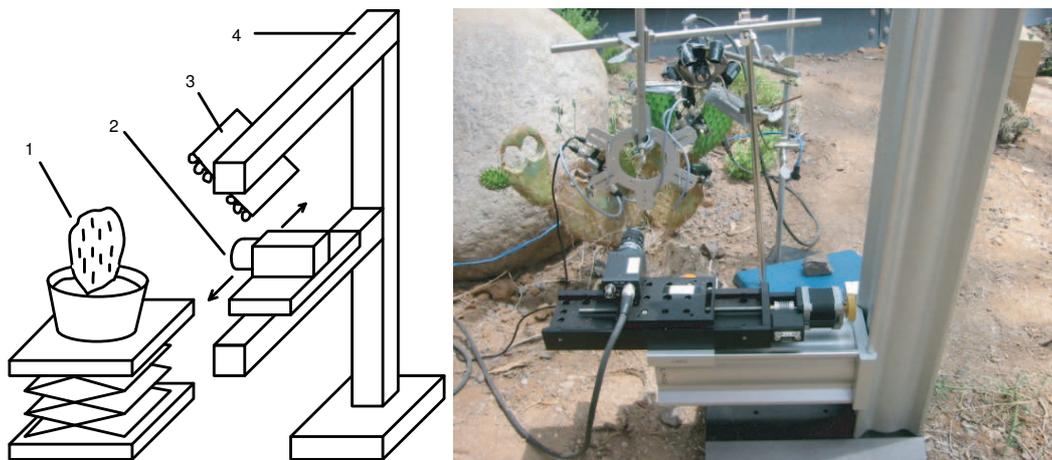


Abbildung 6.1: Aufbau zur Messung von Wuchsraten: (**links**) Skizze des Aufbaus: (1) Kaktus (2) CCD-Kamera auf Linearverschiebetisch (3) IR-LEDs zur Beleuchtung (4) Gerüst aus stabilen Trägern. (**rechts**) Bild des Aufbaus im Wüstenbiom des Biosphere 2 Center.

6.1.2 Bildaufnahme und Auswertung

Um die Bedienung des Systems zu vereinfachen, wurden die entwickelten Programme in mehrere Teile zerlegt:

1. *Aufnahmeteil:* Dieses Programm steuert die Bildaufnahme. In einem vorgegebenen zeitlichen Abstand fährt der Verschiebetisch die verschiedenen Positionen an. An jeder der Positionen wird eine Aufnahme gemacht und danach die Ausgangsposition angefahren. Das Aufnahmeprogramm wurde in HEURISKO (AEON, Hanau) geschrieben.
2. *Tiefen- und Flussfeldbestimmung:* Um Helligkeitsunterschiede in den Bildern zu minimieren, werden die Originalbilder hochpassgefiltert. Im ersten Teil der Auswertung wird mit dem entwickelten Verfahren die Tiefe und der optische Fluss in den hochpassgefilterten Bildsequenzen bestimmt. Diese Daten bilden die Basis für die Weiterverarbeitung. Die Programmierung dieses Programms erfolgte ebenfalls in HEURISKO, mit eingebetteten C bzw. C++ Routinen.
3. *Wuchsratenberechnung:* Dieser Auswertungsschritt umfasst drei separate Teile. Zuerst wird die z-Geschwindigkeit berechnet (vergleiche Kapitel 3.2.1), dann in Weltkoordinaten umgeichtet

(vergleiche Kapitel 3.2.2) und schließlich die Wachsraten aus Teilflächenänderungen bestimmt (vergleiche Kapitel 3.2.3). Alle drei Programme wurden komplett in HEURISKO geschrieben.

4. *Visualisierung*: Da es sich um 3D-Daten handelt, ist für die Interpretation der Messergebnisse eine angemessene Darstellung wichtig. Alle 3D-Visualisierungen erfolgten mit POV-Ray, einem frei erhältlichen Raytracing-Programm.

6.1.3 Kalibrierung

Das Verfahren liefert für jedes Pixel einen Tiefenwert $Z(x, y)$. Für eine echte 3D-Rekonstruktion der beobachteten Objekte ist zusätzlich die Lage in x - und y -Richtung notwendig. Um die xy -Position der an den Pixeln abgebildeten Strukturen im Raum berechnen zu können, muss eine Kalibrierung durchgeführt werden.

Um die Wachsraten der beobachteten Objekte zu berechnen, ist keine Kalibrierung notwendig: Da die Wachsraten über relative Flächenänderungen berechnet wird, ist deren absolute Größe nicht relevant.

6.2 Aufbau zur Kronendachrekonstruktion

Unter den getesteten Aufnahmeobjekten war unter anderem ein *Ficus*-Busch (vergleiche Kapitel 8.1.3). Die gelungene Oberflächenrekonstruktion legt nahe, dass sich auch das Blattwerk anderer Pflanzen als Oberfläche rekonstruieren lässt, vorausgesetzt die Blätter liegen dicht genug. Ziel des vorgestellten Aufbaus Experiments war die Rekonstruktion des Kronendaches eines tropischen Regenwaldes. Die Grundidee ist hierbei, zueinander rotierte Teilrekonstruktionen des Kronendaches zu einer Gesamtoberfläche zusammenzusetzen. Die Einzelpositionen werden über einen rechnergesteuerten Roboterarm angefahren.

6.2.1 Geräte und Aufbau

Teile der hier beschriebenen Dissertation wurden am Biosphere 2 Center in Oracle (Arizona, USA) erarbeitet. Das Biosphere 2 Center besteht aus mehreren großen Glashäusern mit spezifischen Klimazonen, den *Biomen* (Abbildung 6.2). Das Regenwaldbiom beherbergt auf etwa 1800 qm Pflanzen des tropischen Regenwaldes, insgesamt ca. 80 Spezies. Das Gebäude besteht aus einer stabilen Gitterkonstruktion ("Spaceframe"), auf die die Glasscheiben aufgebracht wurden. Über den Spaceframe ist der Kronendachbereich der Bäume relativ leicht zu erreichen.

Um Einsicht in einen möglichst großen Teil des Kronendaches zu gewinnen, wurde der Aufbau im Spaceframe des Bioms in etwa 15 Meter Höhe installiert. Wie auch im Aufbau zur Wachsratenberechnung (vergleiche Kapitel 5.2) werden die verschiedenen Kamerapositionen durch Verschiebung einer einzelnen Kamera mit Linearverschiebetischen angefahren. Da die Entfernung des Kronendaches von der Kameraposition zwischen 5 und 30 Metern lag, wurde als Entfernung der Kamerapositionen ein Wert von 5 cm gewählt. In diesem Abstand ließen sich auch mehrere Kameras nebeneinander positionieren, deren exakt parallele Ausrichtung ist allerdings schwierig. Um dies zu umgehen, wurde die



Abbildung 6.2: Das Biosphere 2 Center in Oracle, Arizona. Das Regenwaldbiom befindet sich in der mehrstufigen Pyramide im linken Bildteil.

Verschiebetischmethode verwendet. Zwar liegt die Verfahrzeit zwischen den einzelnen Positionen im Bereich von etwa 10 Sekunden, da das Kronendach sich in dieser Zeit aber kaum bewegt, spielt diese Verzögerung für die Qualität der Rekonstruktion kaum eine Rolle (im Regenwaldbiom sorgen große Ventilatoren für Luftbewegungen, diese wurden für die Zeit der Aufnahmen abgestellt).

Kamera und Verschiebetisch sind auf einen um zwei Achsen rotierbaren Kameraarm montiert (Modell HS-310P, Vinten TSM Inc.). Dieser Roboterarm lässt sich rechnergesteuert drehen (Abbildung 6.3). Die Genauigkeit der Winkelansteuerung liegt laut Herstellerangaben bei 18 Bogensekunden. Um sicherzustellen, dass Rechner und Monitor bei tropischen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten funktionieren, wurden diese in einen mit Kunststoffolie umhüllten Kasten gestellt. An einem Ende dieser Konstruktion wurde ein Kühlgerät positioniert, das kalte Luft in die Hülle bläst. Das andere Ende lässt sich öffnen, an diesem Ende wird gearbeitet (Abbildung 6.3). Diese Kastenkonstruktion steht auf einem Brett mit ca. 80 cm Breite und 2,5 Metern Länge. Dieses ruht auf horizontalen Streben des Innengitters. Ebenfalls am Innengitter ist ein ca. 70 cm langer Ausleger befestigt, auf diesem ist der Kameraarm montiert (Abbildung 6.4).

Die für alle Aufnahmen verwendete CCD-Kamera (XC75, Sony) liefert zusammen mit dem Framgrabber (PCEYE4, Eltec, Mainz) ein Schwarzweißbild mit der Auflösung von 480×640 Pixel, die möglichen Grauwerte liegen zwischen Null (schwarz) und 255 (weiß). Ein 25mm-Objektiv (Cosmicar/Pentax) wurde wegen der gewünschten Verzerrungsarmut gewählt.

Zur Steuerung des Kameraarmes wurde eine Anbindung realisiert, bei der der Rechner über einen TCP/IP-Analog-Wandler die extern in einer SQL-Datenbank gespeicherten Positionswerte anfährt. Unter Bürobedingungen funktionierte dieses System tadellos. Obwohl die Kameraarme schon früher

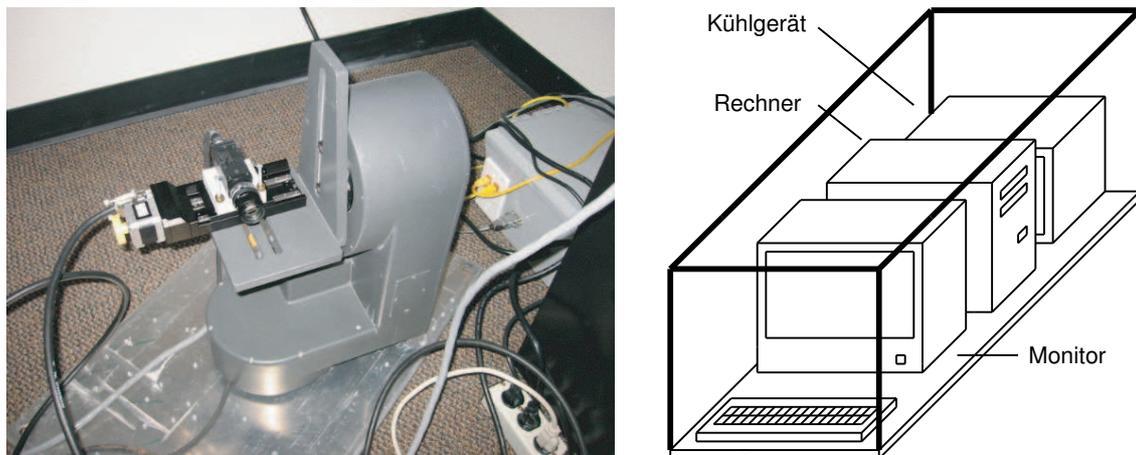


Abbildung 6.3: Aufbau zur Kronendachrekonstruktion: (*links*) Steuerbarer Kameraarm: Auf den um zwei Achsen drehbaren Kameraarm ist ein Verschiebetisch montiert, dieser bewegt die Kamera linear. (*rechts*) Skizze der Messplattform: Auf einem etwa $0,8 \times 2,5$ Meter großen Brett stehen Tastatur, Rechner und Monitor. Der Aufbau ist von einem Gerüst mit Abdeckplane umhüllt. Die Plane schützt vor Regen und Feuchtigkeit. Ein Kühlaggregat bläst ständig kalte Luft in den Aufbau.

dort eingesetzt wurden, gelang es nicht, sie im Regenwaldbiom anzusteuern: Der benutzte Kameraarm war etwa 15 Jahre alt, eventuell hat die Isolation der Elektronik im Laufe der Zeit gelitten. So wurden die gewünschten Positionen von Hand angefahren: Der Arm wurde von Hand gedreht, bis die Ränder von neuer und alter Position aneinander lagen. Die Genauigkeit der manuellen Drehungen liegt bei einigen Pixeln. Insgesamt betrug die Zahl der Kamerapositionen 140, die Daten von 122 davon flossen in die Gesamtrekonstruktion ein (Abbildung 8.25).

Die manuellen Aufnahmen wurden im Laufe von vier Tagen gemacht. Eine künstliche Beleuchtung war im vorliegenden Fall unmöglich. Unterschiedliche Teile des Bioms sind verschieden hell. Um die Teilbilder an allen Positionen optimal auszuleuchten, wurde die Blende für jede Position manuell angepasst. Durch Benutzung einer Kamera mit automatischer Helligkeitsanpassung kann dies automatisiert werden.

6.2.2 Bildaufnahme und Auswertung

Die Aufnahme und Auswertung der Bildsequenzen erfolgt in mehreren getrennten Schritten:

1. *Aufnahmeteil:* Das Programm steuert die Bildaufnahme, in einem vorgegebenen zeitlichen Abstand fährt der Verschiebetisch die verschiedenen Positionen an, an jeder der Positionen wird eine Aufnahme gemacht und danach die Ausgangsposition angefahren. Das Aufnahmeprogramm wurde in HEURISKO (AEON, Hanau) geschrieben, die Ansteuerungssoftware für den Kameraarm in VisualBasic.
2. *Tiefenbestimmung:* Im ersten Teil der Auswertung wird mit dem entwickelten Verfahren die Tiefe in den aufgenommenen Bildsequenzen bestimmt. Auf die simultane Berechnung des optischen Flusses wird in diesem Fall verzichtet: Interessant ist hier nicht die kurzfristige Dynamik



Abbildung 6.4: Kronendachrekonstruktion: (**oben**) Lage der Messplattform im Innengerüst des Regenwaldbioms. Sie ist in etwa 15 Meter Höhe installiert. Der Zugang zur Messplattform erfolgt durch das Gerüst, die Kletterer sind durch ein Fixseil gesichert. (**unten**) Montierter Kameraarm und Messplattform: Die Drehungen erfolgten von Hand, da die Fernsteuerung nicht funktionierte.

der Oberfläche, diese beschränkt sich im wesentlichen auf Neigungsänderungen der Blätter. Eine Untersuchung von Wachstumsdynamiken ist trotzdem denkbar: Wird die Kronendachoberfläche in regelmäßigen Abständen vermessen, so lässt sich aus deren Lageänderungen der Zuwachs in unterschiedlichen Bereichen feststellen. Diese Daten bilden die Basis für die Weiterverarbeitung. Die Implementierung dieser Routinen erfolgte ebenfalls in HEURISKO, mit eingebetteten C bzw. C++ Routinen.

3. *Fusion von Teilrekonstruktionen:* Dieser Programmteil berechnet den Raumwinkelüberlapp und transformiert die Tiefen- und Pixeldaten in Weltkoordinaten (vergleiche Kapitel 4). Die Gesamtheit der rekonstruierten Positionen repräsentiert die Oberfläche. Dieser Programmteil ist in HEURISKO programmiert.
4. *Visualisierung:* Die 3D-Darstellung der berechneten Oberflächenpunkte erfolgt in POV-Ray, einem frei erhältlichen Raytracer.

6.2.3 Kalibrierung

Das 3D-Rekonstruktionsverfahren liefert für jedes Pixel einen Tiefenwert $Z(x, y)$. Für eine echte 3D-Rekonstruktion der beobachteten Objekte ist zusätzlich die Lage in x- und y-Richtung notwendig. Um die xy-Position der an den Pixeln abgebildeten Strukturen im Raum berechnen zu können muss eine Kalibrierung durchgeführt werden. Die Struktur des Bioms lässt eine relativ einfache Kalibrierung zu: In vielen der Teilbildern ist der Spaceframe zu sehen, die Größe und Entfernung dieser Strukturen ist aus den Bauskizzen bekannt. Dieses Verfahren wird in Anhang D beschrieben.

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Umsetzung der beiden experimentellen Anwendungen beschrieben: Ein Verfahren zur Bestimmung von relativen Wuchsraten auf Pflanzenorganen und ein Verfahren zur Rekonstruktion ausgedehnter Kronendachoberflächen. Nach der Beschreibung der verwendeten Aufbauten wurde ein Überblick über den Aufbau der verwendeten Software gegeben und schließlich die notwendigen Kalibrierungen vorgestellt.

Kapitel 7

Genauigkeitsabschätzungen

7.1 Genauigkeit der neuen Strukturtensoverfahren

Dieser Abschnitt untersucht die Genauigkeiten der entwickelten Bildverarbeitungsmethoden auf einer Reihe von synthetischen und realen Bildsequenzen. Dies wird sowohl für die simultane Tiefen- und Flussbestimmung als auch für die zusätzliche simultane Divergenzschätzung durchgeführt.

In allen hier beschriebenen Experimenten sind optimierte Ableitungfilter benutzt worden [71]:

- Für zwei Kamerapositionen wurden separierbare $3 \times 3 \times 2 \times 3$ -Filter mit x-, y- und t-Ableitung $[0,5;0;-0,5]$ sowie der s-Ableitungskern $[-1;1]$ benutzt, die in alle anderen Richtungen mit Glättungskernen gefaltet wurden. Die Glättungskerne sind $[3;10;3]/16$ in x-, y-, und t-Richtung, sowie $[1;1]$ in s-Richtung.
- Für drei Kamerapositionen wird $[0,5;0;-0,5]$ als Ableitungskern und $[3;10;3]/16$ als Glättungskern benutzt.
- Für fünf Kamerapositionen wird ein Ableitungskern $[0,0838;0,3324;0;-0,3324;-0,0838]$ und ein Glättungskern $[0,0234;0,2416;0,4700;0,2416;0,0234]$ benutzt.

7.1.1 Genauigkeit des Tiefen- und Flussverfahrens

Die lokale Nachbarschaft Ω und Wichtungen W (Gleichung (2.3)) wurden über Binomialfilter B mit Varianzen $\sigma^2 = 2$ in x- und y-Richtung, $\sigma^2 = 0$ in s- sowie $\sigma^2 = 1$ t-Richtung implementiert. Diese Größen haben Einfluss auf die Rauschstabilität. Sie steigt mit zunehmender Filtergröße. Da dieser Effekt bekannt ist [71], wird er hier nicht näher gezeigt. Unter einem Wert von $\tau = 0,0012$ wurden die Eigenwerte des Strukturtenso als Null angenommen.

Ergebnisse auf synthetischen Sequenzen

Um die Genauigkeit der entwickelten Algorithmen zu quantifizieren, wurden die Geschwindigkeit und Disparität eines bewegten Wellenmusters $g(x, y, s, t) = \cos(k_x(x - s - u_x t)) * \cos(k_y(y - s - u_y t))$

mit variablen Wellenzahlen k_x, k_y gemessen. Zu diesen Sequenzen ist ein normalverteiltes Rauschen mit einer Standardabweichung von bis zu $\sigma_n = 0.05$ addiert worden.

Abbildung 7.1 zeigt die relativen Fehler und Varianzen der geschätzten Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für zwei Kamerapositionen. Der Verlauf der Kurven stimmt gut mit den Ergebnissen für vergleichbare Berechnungen bei konventionellem optischen Fluss überein [71]. Größere optimierte Filter haben kleinere Richtungsfehler. Deshalb sind die relativen Fehler der Disparität v_x für drei Kameras signifikant kleiner als für den Fall von zwei Kamerapositionen (Abbildung 7.2). Die Fehler der Geschwindigkeit u_x sind nahezu gleich. Für fünf Kamerapositionen nehmen die Fehler für u_x und v_x um etwa 1,5 Größenordnungen ab (Abbildung 7.3).

Bei verrauschten Daten nehmen relative Fehler und Varianzen zu. Beide sind für zwei oder drei Kamerapositionen im Prozentbereich stabil sowie für fünf Kameras im Promillebereich, falls $u_x > 0,01\lambda$ oder $v_x > 0,01\lambda$.

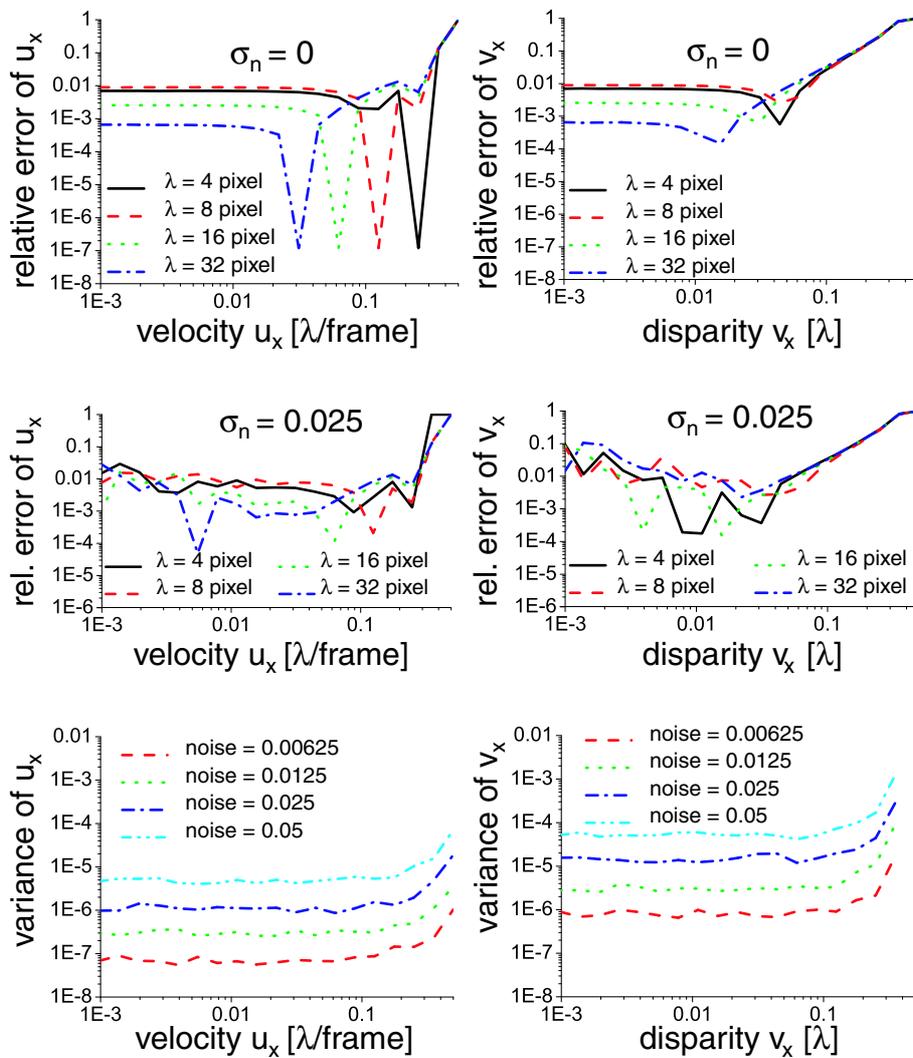


Abbildung 7.1: Zwei Kamerapositionen: (*oben*) Relative Fehler von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen ohne Rauschen ($\sigma_n = 0$). (*mitte*) Relative Fehler von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen mit Rauschen $\sigma_n = 0,025$). (*unten*) Varianzen von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen mit unterschiedlichem Rauschen σ_n . Die Wellenlänge beträgt 8 Pixel.

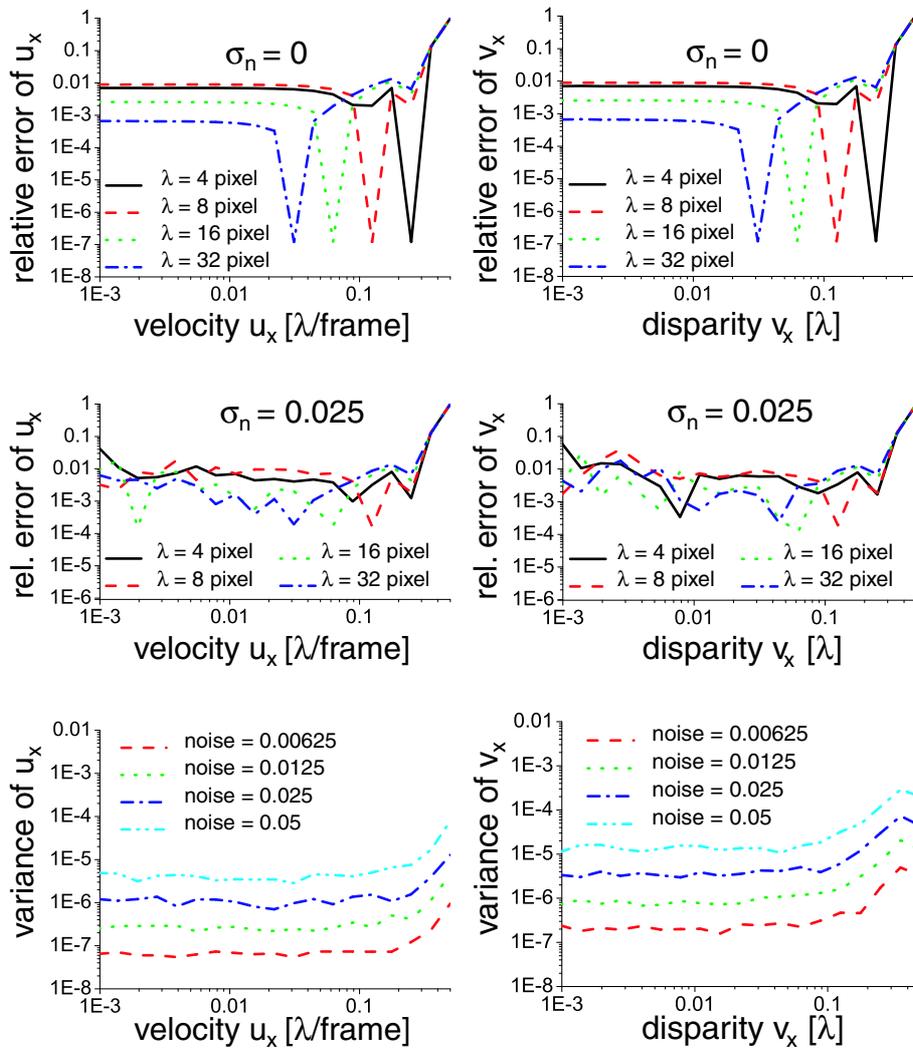


Abbildung 7.2: Drei Kamerapositionen: (**oben**) Relative Fehler von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen ohne Rauschen ($\sigma_n = 0$). (**mitte**) Relative Fehler von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen mit Rauschen $\sigma_n = 0, 025$). (**unten**) Varianzen von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen mit unterschiedlichem Rauschen σ_n . Die Wellenlänge beträgt 8 Pixel.

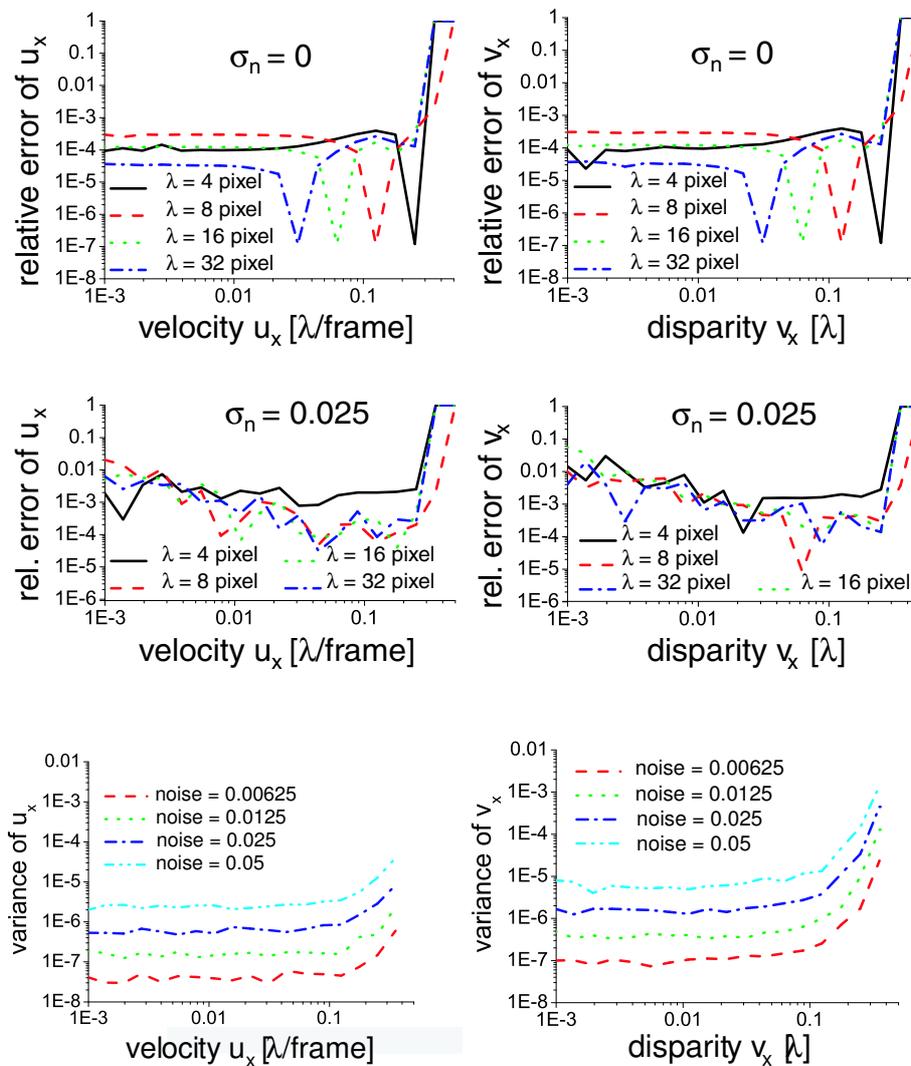


Abbildung 7.3: Fünf Kamerapositionen: (**oben**) Relative Fehler von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen ohne Rauschen ($\sigma_n = 0$). (**mitte**) Relative Fehler von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen mit Rauschen $\sigma_n = 0,025$). (**unten**) Varianzen von Geschwindigkeit u_x und Disparität v_x für Sequenzen mit unterschiedlichem Rauschen σ_n . Die Wellenlänge beträgt 8 Pixel.



Abbildung 7.4: Würfelsequenz: (*links*) Originalbild des Würfels. (*mitte*) Bild des Ranges, in dem grauen Bereich war die Rekonstruktion erfolgreich. (*rechts*) Rekonstruierte 3D-Oberfläche mit projiziertem Originalbild.

Ergebnisse auf realen Sequenzen

Um das Funktionieren der Methode auf echten Sequenzen zu illustrieren, werden die Ergebnisse für einen Würfel gezeigt, der sich in x-Richtung bewegt. Die Rechnungen werden für zwei, drei und fünf Kamerapositionen durchgeführt. Die Seitenlänge des Würfels beträgt 4,9 cm, seine Seiten sind mit einem Rauschmuster bedeckt (vergleiche Anhang B). Der Würfel wurde per Verschiebetisch wiederholt um etwa 0,3 Pixel im Bild verschoben. Der Abstand der Kamerapositionen lag bei 0,5 cm. Die Entfernung von Kamera- und Objektposition war etwa 70 cm. Da die mittlere Disparität in dieser Tiefe etwa 12 Pixel betrug, wurden die Bilder um $12s$ verschoben, s ist hierbei die Nummer der Kamera. Die Varianz des Rauschen beträgt in dieser Sequenz etwa $\sigma_n = 0,02$. Bei diesen Einstellungen kann auf der gesamten sichtbaren Würfelfläche rekonstruiert werden (Abbildung 7.4).

Die berechneten Geschwindigkeiten u_x sind in Abbildung 7.5 links dargestellt. Sie sind grauwertcodiert dargestellt, hellere Bereiche entsprechen höheren Geschwindigkeiten. Die der Kamera zugewandte Vorderkante erscheinen hell, dies spiegelt die räumliche Lage wider: Im Bild bewegt sich die Vorderkante schneller als die hinteren Kanten. Die Geschwindigkeitsprofile der markierten Zeilen sind rechts dargestellt. Die Geschwindigkeit der Vorderkanten beträgt etwa 0,296 Pixel/Frame für zwei und drei Kamerapositionen und etwa 0,300 Pixel/Frame für fünf Kamerapositionen. Dies stimmt gut mit den erwarteten 0,3 Pixel/Frame überein und nimmt zu den hinteren Kanten des Würfels hin ab. Außerdem erscheint die Vorderkante bei zunehmender Zahl von Kamerapositionen weniger abgerundet.

Die Disparität v_x wird grauwertcodiert in Abbildung 7.6 links gezeigt, hellere Bereiche entsprechen höheren Disparitäten. Aus diesen können unter Benutzung des geometrischen Kameramodells Tiefenkarten berechnet werden. Gerenderte 3D-Rekonstruktionen dieser Tiefenkarten sind rechts dargestellt. Wie im Falle der Geschwindigkeit u_x liefern fünf Kamerapositionen die besten Ergebnisse: Die Oberfläche erscheint glatter als für zwei oder drei Positionen, außerdem erscheint die Vorderkante mit zunehmender Zahl von Positionen schärfer. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Oberflächen nicht zusätzlich geglättet oder gefiltert wurden.

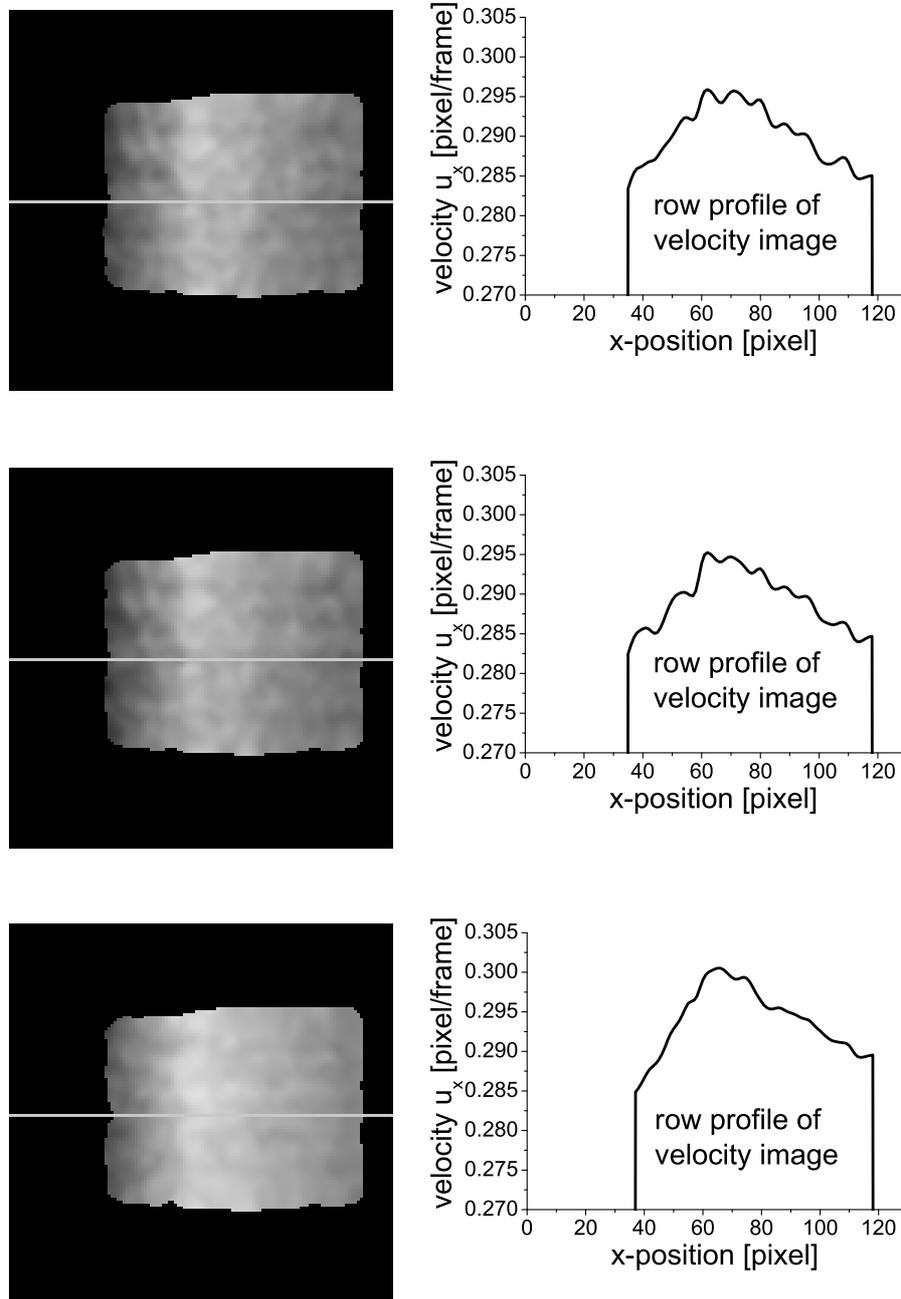


Abbildung 7.5: Würfelsequenz: Vergleich der berechneten Geschwindigkeiten für (**oben**) 2 Kamerapositionen, (**mitte**) 3 Kamerapositionen und (**unten**) 5 Kamerapositionen. Der Verlauf des Zeilenprofils wird mit steigender Zahl von Kamerapositionen glatter.

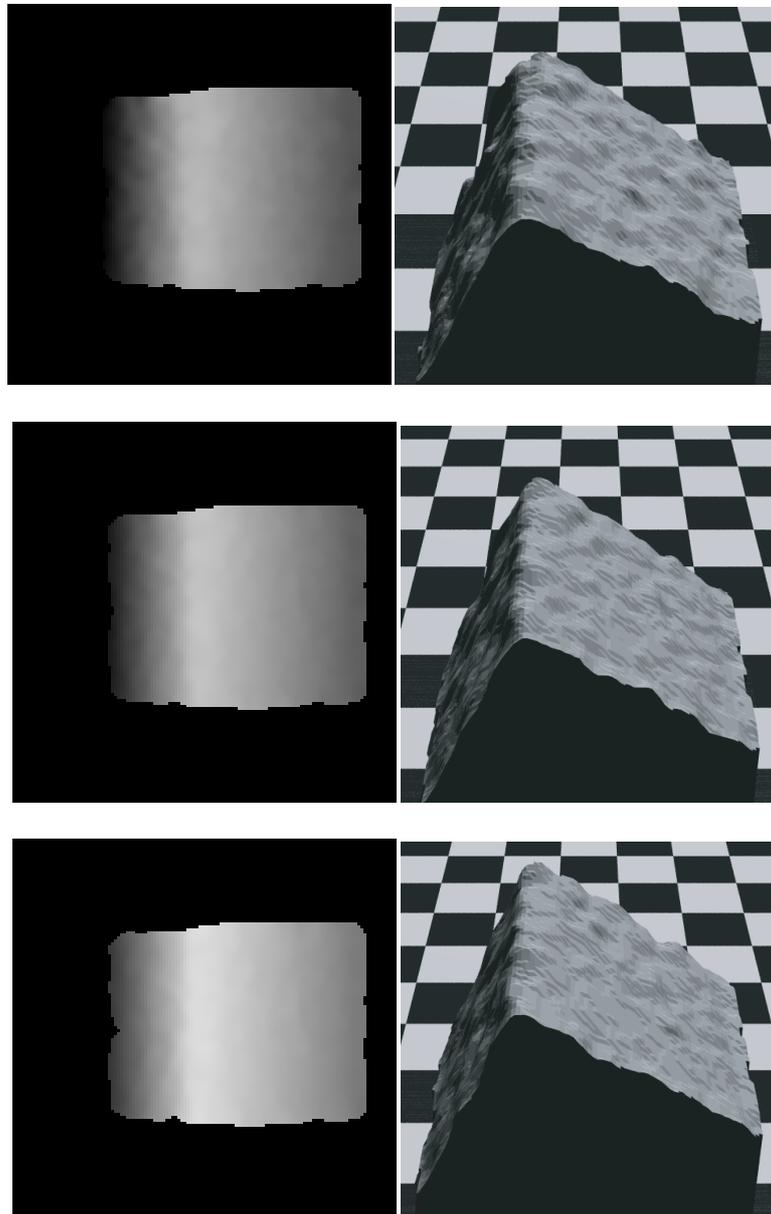


Abbildung 7.6: Würfelsequenz: Vergleich der berechneten Tiefen für (**oben**) 2 Kamerapositionen, (**mitte**) 3 Kamerapositionen und (**unten**) 5 Kamerapositionen. Die Glattheit der Oberfläche nimmt mit steigender Zahl von Kamerapositionen zu, gleichzeitig wird die Vorderkante des Würfels schärfer rekonstruiert.

7.1.2 Genauigkeiten bei simultaner Divergenzschätzung

Die lokale Nachbarschaft Ω und Wichtungen W (Gleichung (2.3)) wurden über Binomialfilter B mit Varianzen $\sigma^2 = 6$ in x- und y-Richtung, $\sigma^2 = 0$ in s- sowie $\sigma^2 = 1$ t-Richtung implementiert. Diese Filter B haben 25 Pixel Länge für x- und y-Richtung und 5 Pixel Länge in t-Richtung, in s-Richtung wird nicht gefiltert. Die Größen von B haben Einfluss auf die Rauschstabilität. Sie steigt mit zunehmender Filtergröße. Da dieser Effekt bekannt ist [71], wird er hier nicht näher gezeigt. Unter einem Wert von $\tau = 0,0012$ wurden die Eigenwerte des Strukturtenso als Null angenommen.

Ergebnisse auf synthetischen Sequenzen

Um die Genauigkeit der Algorithmen zu quantifizieren, wurden Geschwindigkeit und Disparität eines fronto-parallelen Musters

$$g(x, y, s, t) = \cos(K_X X) * \cos(K_Y Y)$$

$$X = x \frac{Z_0 + U_Z t}{f} - U_X t + V_X s$$

$$Y = y \frac{Z_0 + U_Z t}{f} - U_Y t$$

mit den Wellenzahlen K_X und K_Y in Weltkoordinaten gemessen (vergleiche Kapitel 2.2.3). In den Testsequenzen galt $f = 10$, $Z(t_0) = 100$ zur Bestimmungszeit t_0 , $V_X = 1$ und $U_X = 0$, $U_Y = 0$, $U_Z = 0$ falls sie nicht variiert wurden (alle in willkürlichen Einheiten). Die Wellenzahlen k_x und k_y in Bildkoordinaten sind $k_x = K_X Z_0 + U_Z t / f$ und $k_y = K_Y Z_0 + U_Z t / f$. Sie wurden auf $k_x = k_y = 2\pi/\lambda$ festgelegt, wobei $\lambda \in \{4, 8, 16, 32\}$ Pixel zur Zeit t_0 . Die 3D-Geschwindigkeit U und die Tiefe Z sind für einen virtuellen Satz von fünf Kameras berechnet worden. Zu diesen Sequenzen wurde keine oder normalverteiltes Rauschen mit einer Standardabweichung von $\sigma_n = 0.025$ (d.h. 2,5 %) addiert.

Die relativen Fehler für die berechnete X-Geschwindigkeit U_X in (beliebigen) Weltkoordinaten für verschiedene Wellenlängen sind in Abbildung 7.7 oben gezeigt. Ohne Rauschen (links) ist dies der systematische Fehler durch numerische und filterbedingte Ungenauigkeiten. Für U_Y sind die Ergebnisse vergleichbar. Der Verlauf der Kurven stimmt gut mit vergleichbaren Messungen im Falle des konventionellen optischen Flusses überein [71]. Der Fehler bleibt unter 0,03 % für $U_X < 4$. Bei kleineren Wellenlängen steigen die Fehler stark an, da man sich den (nicht messbaren) Verschiebungen von $0,5\lambda$ nähert. Falls diese Wellenlängen durch Glätten eliminiert werden, können auch größere Verschiebungen detektiert werden. Für den Fall verrauschter Daten (rechts) steigen die Fehler bei kleinen Werten von U_X stark an, für einen weiten Bereich bleiben sie aber zwischen 0,1 % und 1 %.

Die relativen Fehler für die berechnete Z-Geschwindigkeit U_Z sind darunter aufgetragen (Abbildung 7.7 mitte). Ohne Rauschen (links) liegt der systematische Fehler zwischen 0,3% für $U_Z < 0,1$ und unter 3% für $U_Z < 1$. Für verrauschte Bilder (rechts) steigt der Fehler für kleine Werte von U_Z an, bleibt aber für weite Bereiche zwischen 0,1% und 1%. Da U_X und U_Y über die Komponenten des

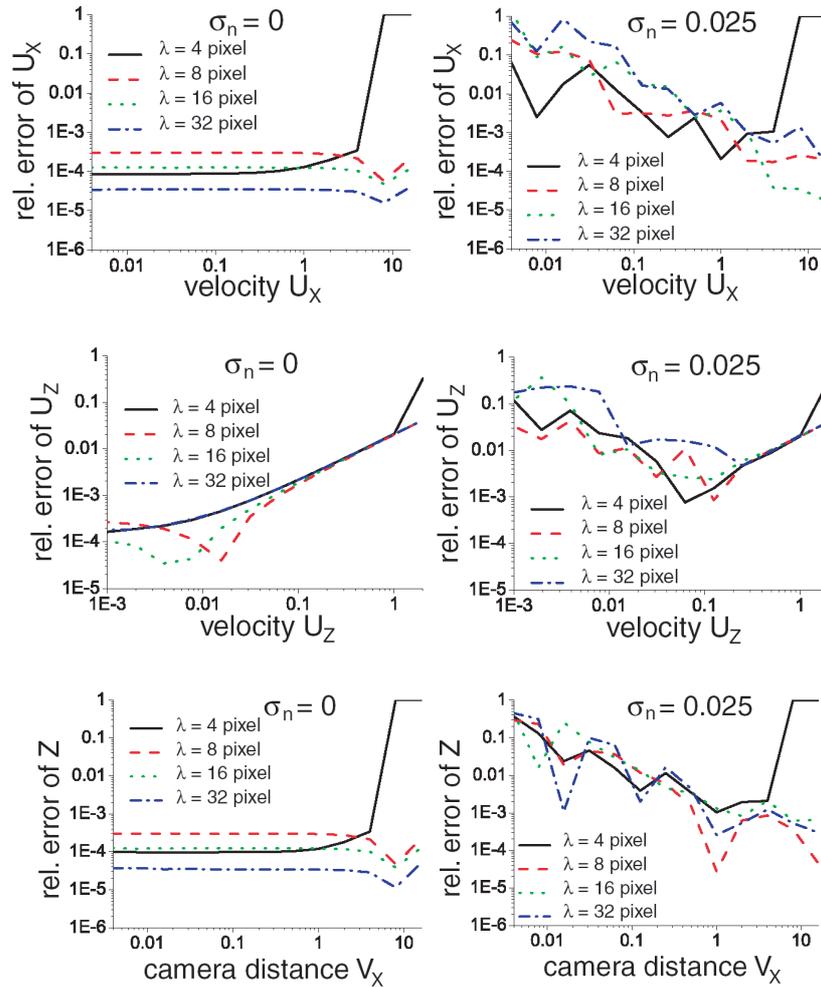


Abbildung 7.7: Relative Fehler für Bestimmung der Geschwindigkeiten U_X , U_Y und der Tiefe Z . (oben) Relativer Fehler für U_X . (mitte) Relativer Fehler für U_Y . (unten) Relativer Fehler für die Tiefe Z , abhängig von dem Abstand V_X der Kamerapositionen.

optischen Flusses $u_x = \tilde{p}_{t1}/\tilde{p}_{t4} - x_0 u_z$ und $u_y = \tilde{p}_{t2}/\tilde{p}_{t4} - y_0 u_z$ berechnet werden, gibt es eine Fehlerfortpflanzung von U_Z nach U_X und U_Y . In den hier behandelten Anwendungen ist U_Z allerdings sehr klein, d.h. der absolute übertragene Fehler ist ebenfalls klein.

Die relativen Fehler für die berechneten Tiefen sind in Abbildung 7.7 unten für variierende Kameraabstände V_X dargestellt. Da die Berechnung der Tiefe ähnlich wie die der Geschwindigkeit U_X verläuft, sind die Kurven sehr ähnlich.

Ergebnisse auf echten Sequenzen

Um die Genauigkeit der angewandten Techniken auf echten Sequenzen zu illustrieren, werden die Ergebnisse für einen sich in Z -Richtung bewegenden Würfel gezeigt, der von fünf Kamerapositionen aufgenommen wird. Wieder stammen die Testsequenzen aus den in Anhang B beschriebenen Würfel-

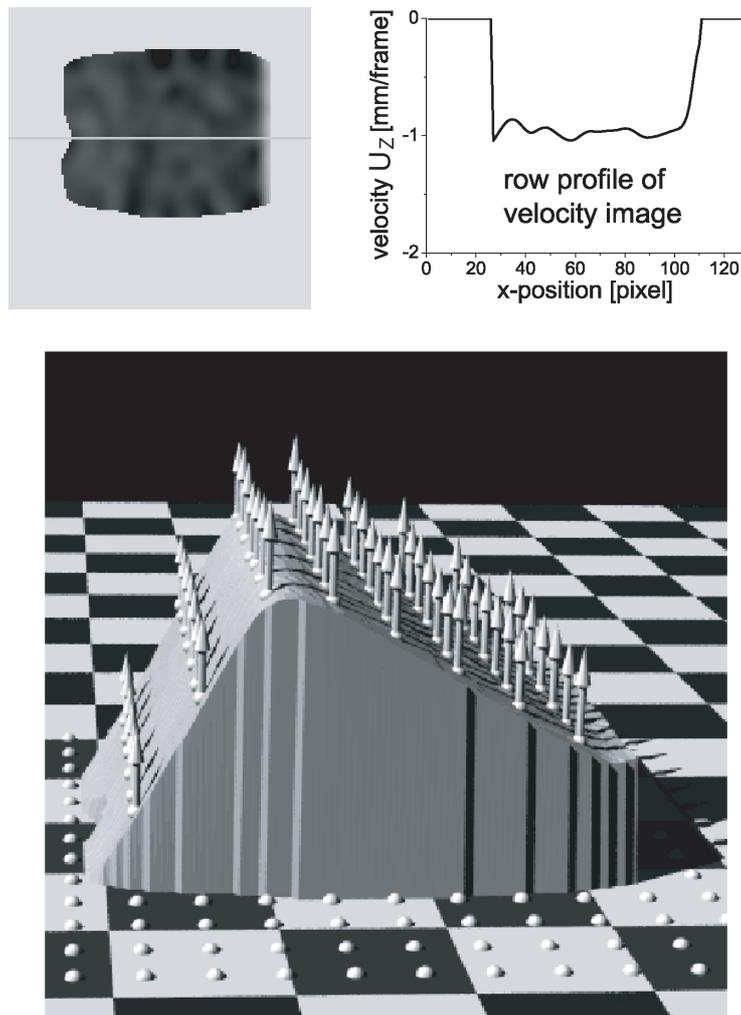


Abbildung 7.8: Ergebnisse auf Würfelsequenz: (*oben*) Bild der berechneten Geschwindigkeit U_z und Profil der markierten Zeile. (*unten*) Rekonstruierte 3D-Oberfläche mit projiziertem Geschwindigkeitsfeld.

aufnahmen. Der Würfel wurde mit einem Verschiebetisch wiederholt um 1mm auf die Kamera zubewegt. Der Abstand der Kamerapositionen V_X war $0,5\text{ cm}$ und die mittlere Kamera-Objekt-Entfernung lag bei ca. 66 cm . Die mittlere Disparität betrug 38 Pixel , deshalb wurden die nichtzentralen Bilder um ± 38 oder $\pm 76\text{ Pixel}$ verschoben.

Die berechnete Z-Geschwindigkeit U_z ist in Abbildung 7.8 grauwertcodiert dargestellt, hellere Bereiche stehen für höhere Geschwindigkeiten. Die 55. Zeile ist markiert, deren Profil ist rechts dargestellt. Ebenfalls dargestellt (unten) ist eine 3D-Rekonstruktion des Würfels. Diese zeigt wieder eine abgerundete Vorderkante, die Seitenflächen sind gut rekonstruiert. Zusätzlich ist noch das berechnete Geschwindigkeitsfeld dargestellt, aus Visualisierungsgründen sind die Bewegungsvektoren um einen Faktor fünf verlängert dargestellt. Sie sollten parallel und von gleicher Länge sein, beides ist gut erfüllt.

7.2 Genauigkeiten der Wachsratenberechnungen

Die Genauigkeit des in Kapitel 3.2 beschriebenen Verfahrens zur Berechnung der relativen Wachsrates soll anhand von synthetischen und realen Sequenzen überprüft werden. Die Aufnahme realer Ground-Truth-Sequenzen wachsender Objekte ist schwierig: Definiertes Wachstum von Objekten kommt in der Natur nicht vor, selbst die Größenänderung von einfachen Objekten wie eines Luftballons lässt sich ohne grossen experimentellen Aufwand nicht definiert steuern. Mit Raytracing-Programmen lassen sich selbst komplexe Objekte, Texturen und Bewegungen simulieren. Die im weiteren beschriebenen synthetischen Sequenzen sind mit dem Raytracer POV-RAY erzeugt worden. Alle vorgestellten Sequenzen wurden für fünf Kamerapositionen ausgewertet. Ausserdem sei darauf hingewiesen, dass in den vorgestellten Auswerteschritten nicht geglättet wurde.

7.2.1 Genauigkeit auf echten Sequenzen

Die hier ausgewertete Sequenzen zeigen einen sich in negative z-Richtung (d.h. auf die Kamera zu) bewegendem Würfel (vergleiche Anhang B). Die Größe des Würfels ändert sich während der Sequenz nicht. Die Seiten des Würfels haben eine Länge von 4,9 cm, seine Seiten sind mit einem Rauschmuster versehen. Der Abstand von Objekt und Kamera beträgt etwa 70 cm, der Abstand der fünf Kamerapositionen zueinander beträgt jeweils 5 mm. Der Würfel wurde mit einem Verschiebetisch wiederholt um 1 mm in Kamerarichtung verschoben. Die im Bild rechte Würfelseite (Abbildung 7.9) ist um 30 Grad gegen die Bildebene geneigt. Die Größe des Würfels ändert sich während der Sequenz nicht.

Im Zentralbereich des gezeigten Bildausschnitts (50×50 Pixel) ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit zu -0.9835 mm/Frame, bei einem wahren Wert von -1.0 mm. Der relative Fehler der z-Geschwindigkeit liegt also bei 0,0165. Die mittlere Wachsrates liegt bei 0.01 %/Frame. Der relative Fehler der Wachsrates ist hier also sehr klein.

7.2.2 Genauigkeit auf synthetischen Sequenzen

Die hier ausgewerteten Sequenzen wurden mit dem Raytracer POV-Ray erzeugt. Die Sequenz wurde der in Kapitel 7.2.1 vorgestellten so genau wie möglich nachgestellt (Abbildung 7.10).

Im Zentralbereich des gezeigten Bildausschnitts (50×50 Pixel) ergibt sich die mittlere Geschwindigkeit zu -1.0028 mm/Frame, bei einem wahren Wert von -1.0 mm/Frame. Der relative Fehler der z-Geschwindigkeit liegt hier also bei 0.0028. Die mittlere Wachsrates in den zentralen 50×50 Pixeln liegt bei 0.0001 %/Frame. Der relative Fehler der Wachsrates ist hier also sehr klein. Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen auf den realen Sequenzen, so fällt folgendes auf: Obwohl die Ergebnisse zur Berechnung der z-Geschwindigkeit im Falle der realen Aufnahmen um etwa eine Größenordnung genauer sind, ist der mittlere Fehler der berechneten Wachsrates in der gleichen Größenordnung.

In den letzten beiden Abschnitten wurden Sequenzen untersucht, bei denen sich die Neigung der beobachteten Flächen nicht ändert. Dies kann bei Aufnahmen von frei beweglichen Objekten wie Pflanzenblättern nicht erwartet werden. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass das vorgestellte Verfahren auch bei Objekten mit sich ändernder Neigung und gewölbter Oberfläche korrekte Wachsrates berechnet.

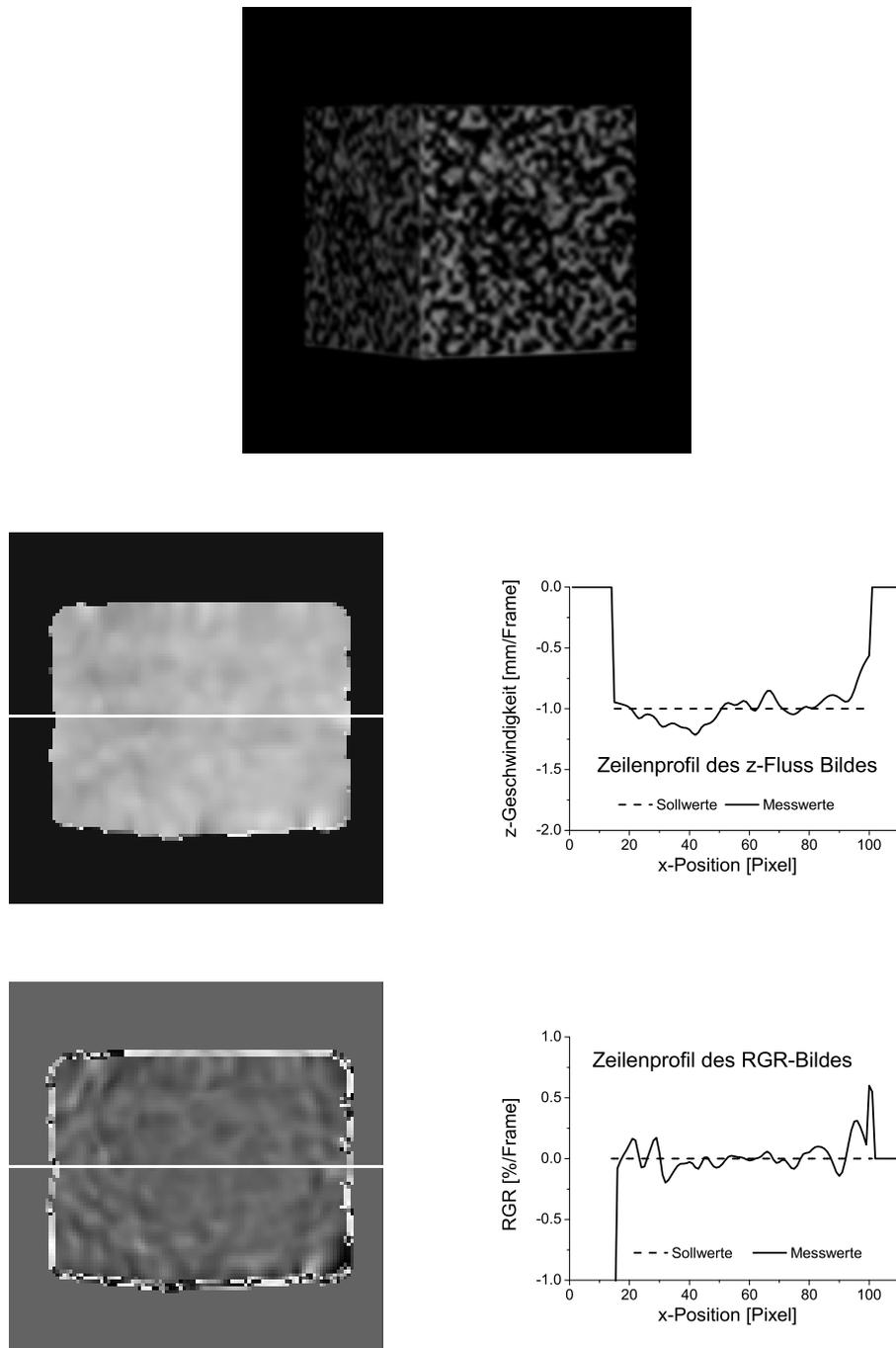


Abbildung 7.9: Bewegter, nicht wachsender Würfel; reale Sequenz: (*oben*) Originalbild (*mitte*) Bild der berechneten z-Geschwindigkeit und Profil der markierten Zeile. (*unten*) Originalbild der Wachsraten und Profil der markierten Zeile.

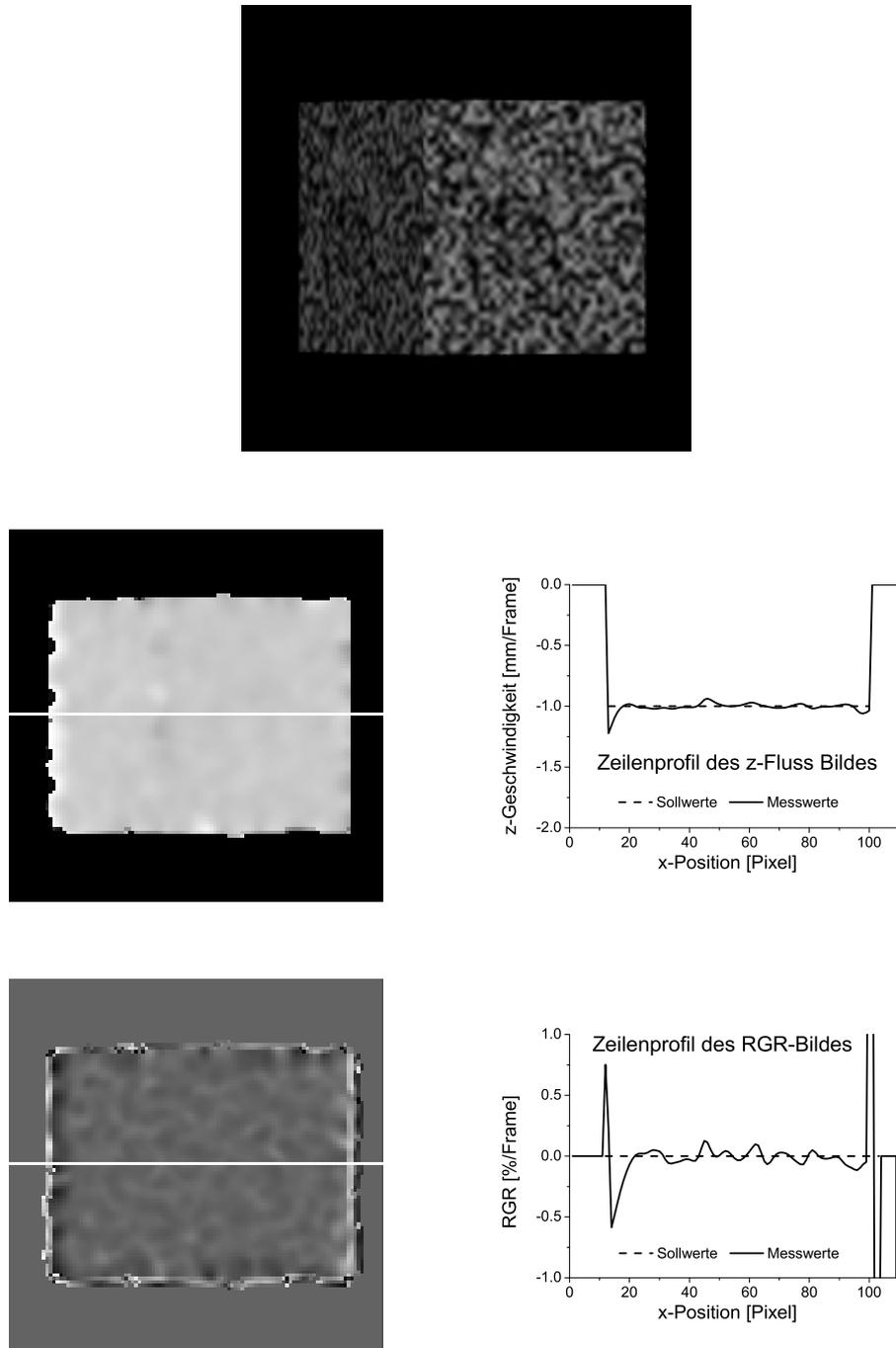


Abbildung 7.10: Bewegter, nicht wachsender Würfel; synthetische POV-Ray Sequenz: (*oben*) Originalbild (*mitte*) Bild der berechneten z-Geschwindigkeit und Profil der markierten Zeile. (*unten*) Originalbild der Wachstumsrate und Profil der markierten Zeile.

Wachsende und rotierende ebene Fläche

Die untersuchte Sequenz zeigt eine quadratische Fläche, die um die vertikale Mittelachse gegen die Bildebene gedreht ist (Abbildung 7.11). Im dargestellten Originalbild liegt die Verdrehung bei 25 Grad, die Neigung ändert sich um 1 Grad pro Frame. Dies resultiert in einer ungleichmäßigen z-Geschwindigkeit. Außerdem wächst die Fläche pro Frame um 1.0 Prozent. Die im zentralen Bereich geschätzte mittlere Wachsrates liegt bei 0.95 %/Frame. Der relative Fehler liegt also bei 0.05.

Es zeigt sich, dass das Verfahren auch bei Sequenzen funktioniert, bei denen die beobachtete Fläche sich gegen die Bildebene dreht. Die Wachsrates wird relativ gut berechnet, allerdings sinkt die Genauigkeit gegenüber den Flächen konstanter Orientierung. Die mittlere Wachsrates im zentralen Bereich (50×50 Pixel) liegt bei 0.95 %/Frame. Der relative Fehler liegt also bei 0.05.

Wachsende und bewegte Kugel

Da die Oberfläche der beobachteten Objekte gekrümmt sein kann, macht es Sinn, das vorgestellte Verfahren auf Oberflächen unterschiedlicher Neigung anzuwenden. Einen einfachen Überblick hierüber bietet z.B. die Auswertung von Sequenzen einer wachsenden Kugel (Abbildung 7.12). Im Folgenden wird eine Sequenz ausgewertet, bei der die beobachtete Kugel pro Frame um 0.1 Prozent wächst und sich dabei dem Betrachter um 0.1 Längeneinheiten nähert. Die mittlere Wachsrates in den zentralen 50×50 Pixeln liegt bei 0.095 %/Frame. Der relative Fehler liegt hier bei 0.05.

Die Auswertung obiger Sequenzen zeigt, dass das Verfahren ausreichend gut zwischen Wachstum und Bewegung in z-Richtung trennen kann. Der Vergleich von Originalbild und dem Bild der Wachsrates zeigt, dass bei ausreichend deutlicher Struktur auf der Objektoberfläche die Wachsrates auch bei starken Neigungen korrekt berechnet werden.

7.3 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass die neu entwickelten Algorithmen das gleiche Verhalten zeigen, wie das bekannte erweiterte Strukturtensoverfahren: Hohe Genauigkeit und Stabilität gegenüber Rauschen, niedrige systematische Fehler, schnelle Implementierung durch optimierte Filter sowie dichte, glatte Parameterfelder. Im Falle von fünf Kamerapositionen sind die Ergebnisse deutlich besser als für zwei oder drei Positionen, sowohl was Genauigkeit als auch was Rauschstabilität betrifft.

Die Trennung von echtem und scheinbarem Wachstum mit der in Kapitel 3.2 entwickelten Methode funktioniert. Wachsrates von bewegten und gewölbten Oberflächen können in einem Bereich von 0,1 %/Frame gemessen werden.

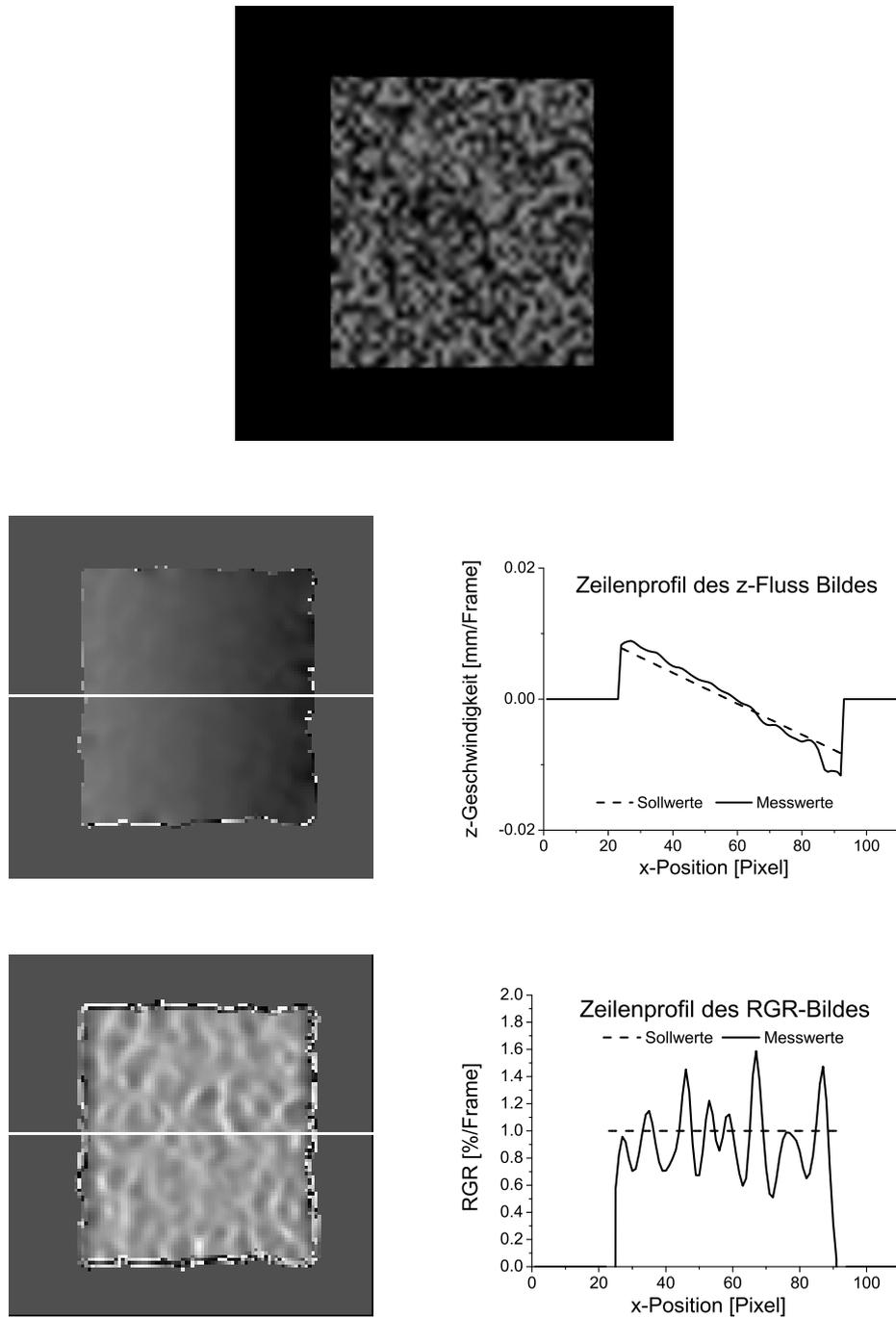


Abbildung 7.11: Fläche mit Neigungsänderung: (*oben*) Originalbild (*mitte*) Bild der berechneten z-Geschwindigkeit und Profil der markierten Zeile. (*unten*) Originalbild der Wachstumsrate und Profil der markierten Zeile. Die dargestellte quadratische Fläche ist um 25 Grad gegen die Bildebene gekippt, rotiert pro Frame um 1 Grad um die vertikale Mittelachse und wächst pro Frame um 1.0 Prozent.

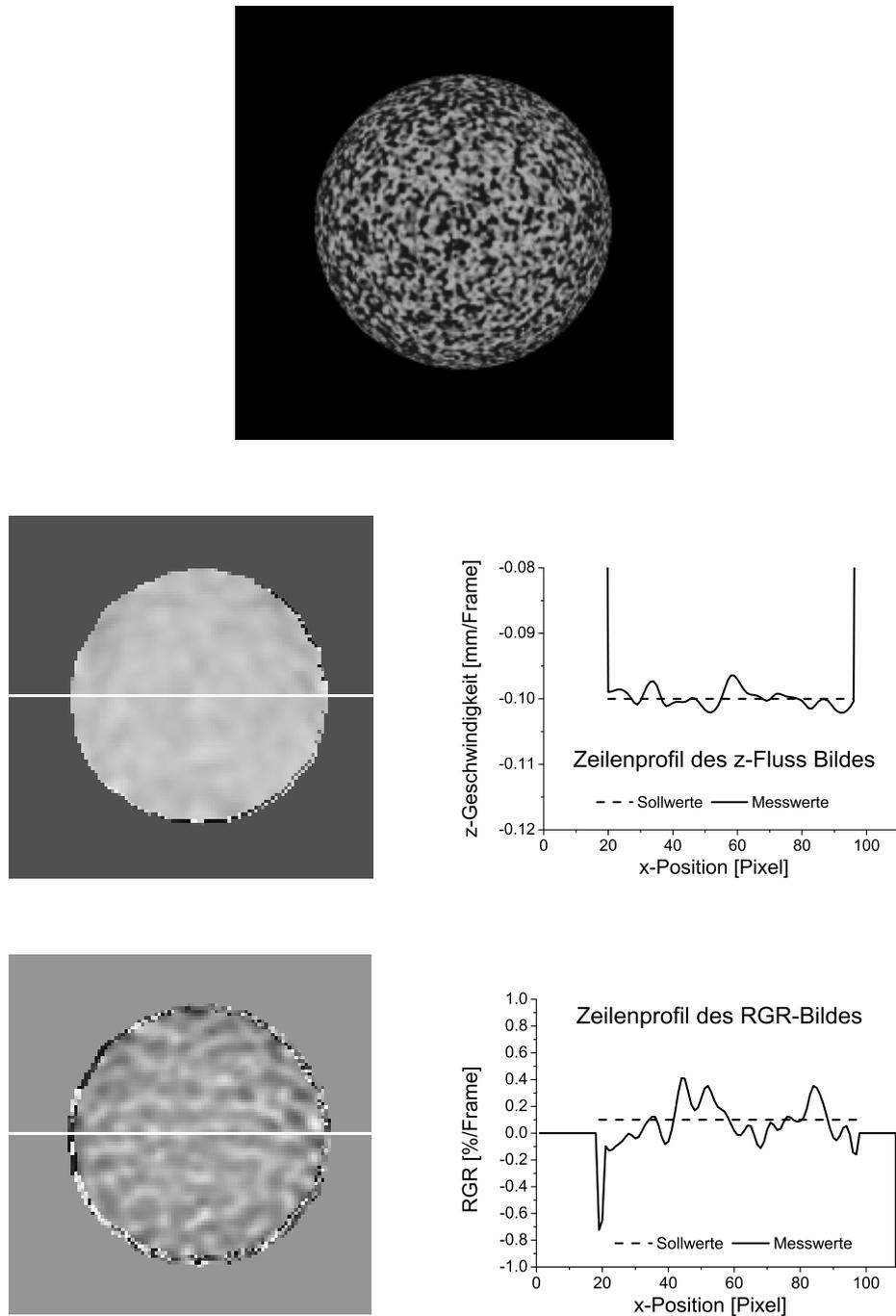


Abbildung 7.12: Wachsende, bewegte Kugel: (*oben*) Originalbild (*mitte*) Bild der berechneten z-Geschwindigkeit und Profil der markierten Zeile. (*unten*) Originalbild der Wuchsrates und Profil der markierten Zeile. Die Kugel nähert sich der Kamera um 0.1 Längeneinheiten pro Frame und wächst pro Frame um 0.1 Prozent.

Kapitel 8

Experimente an Pflanzen

Die vorliegende Arbeit entstand in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe Dynamik pflanzlichen Wachstums des ICG-III innerhalb des Forschungszentrums Jülich. Die Gruppe untersucht die Wachstumsreaktion von Pflanzen auf sich verändernde Umweltfaktoren wie Temperatur oder Nährstoffkonzentration. Zusätzlich zu Reaktionen auf biochemischer und physiologischer Ebene während des Wachstums der Pflanze ist der Einfluss der Umwelt auf die Struktur der Pflanze von Interesse. Die Untersuchung von Zeitreihen der Expansion kann hierzu wichtige Hinweise geben, äußere Parameter wie Feuchtigkeit oder Nährstoffversorgung spiegeln sich oft direkt im Wachstumsverhalten der Pflanzen wider.

Dieses Kapitel beschreibt die Experimente, die mit den entwickelten Methoden durchgeführt wurden. Zuerst wird ein Überblick über Testmessungen zur 3D-Rekonstruktion von verschiedenen pflanzlichen Untersuchungsobjekten gegeben und eine Methode zur einfachen Oberflächenmarkierung beschrieben. Es folgen die Ergebnisse zur Wuchsratenmessung an botanischen Beispielobjekten, Kakteen und Feigen. Schließlich wird die 3D-Rekonstruktion des Kronendaches des Regenwaldbioms im Biosphere 2 Center in Oracle, Arizona, vorgestellt.

8.1 3D-Rekonstruktionen von Pflanzenorganen

Für Oberflächen- bzw. Wachstumsuntersuchungen kommt eine Vielzahl von botanischen Objekten in Frage. Bisherige Wachstumsmessungen beschäftigten sich wegen ihrer relativ einfachen linearen bzw. flächigen Struktur vor allem mit Wurzeln und Blättern. Von botanischer Seite sind aber auch Untersuchungen weiterer Organe interessant. Deshalb wurde eine Reihe von botanischen Objekten versuchsweise rekonstruiert. Die verwendeten Aufbauten entsprechen dem in Kapitel 6.1 vorgestellten: Auf eine stabile Trägerkonstruktion ist eine Kamera-Verschiebetisch-Kombination montiert, die Beleuchtung erfolgt über eine Anordnung von Infrarotdioden.

8.1.1 Oberflächenstruktur und 3D-Rekonstruktionen

Das Strukturtensoverfahren liefert als lokales Verfahren nur für solche Bildregionen Tiefeninformation, in denen ausreichend Grauwertkontraste vorhanden sind. Dies stellt für viele botanische Objekte

ein Problem dar: Natürliche Strukturen, z.B. Blattadern, decken bei vielen Pflanzorganen nur einen kleinen Teil der Oberfläche ab. Falls die Oberfläche farblich nur wenig strukturiert ist, entsteht Struktur im Kamerabild vor allem durch geschickte Beleuchtung des Oberflächenreliefs.

Künstlich auf die Blattoberfläche aufgebrauchte Marker lösen dieses Problem weitgehend. Im vorliegenden Fall werden aufgesprühte Farbtröpfchen verwendet (vergleiche Anhang C). Sie bedecken nur wenige Prozent der Blattoberfläche, die Auswirkungen auf das Photosyntheseverhalten und Wachstum der Pflanze durch die Marker dürften also klein sein.

8.1.2 Objekte mit kontinuierlicher Oberfläche

Neben Blättern ist noch eine Reihe von botanischen Objekten für Wuchsratenmessungen interessant. Im Folgenden wird zwischen kontinuierlichen und nichtkontinuierlichen Oberflächen unterschieden: Bei kontinuierlichen Oberflächen ändert sich die Tiefe von Pixelposition zu Pixelposition nur wenig, der Tiefenverlauf zeigt keine Sprünge. Rekonstruktionen weiterer Objekte mit geschlossenen Oberflächen werden im Folgenden beschrieben:

Tabakblatt

Versuche an Tabakblättern illustrieren die Notwendigkeit einer zusätzlichen Strukturierung: Im zeitlichen Abstand von 120 Sekunden wurde ein frei bewegliches Tabakblatt aufgenommen, die Breite des Bildausschnitts beträgt etwa 10 cm. Dies geschah zum einen mit einem unbehandelten, zum anderen mit einem besprühten Blatt. Obwohl das unmarkierte Blatt in größerer Vergrößerung und günstiger beleuchtet wurde, sind die Ergebnisse auf dem markierten Blatt deutlich besser: Das vorgestellte Verfahren liefert bei dem markierten Blatt fast überall Werte. Der Anteil der Blattfläche, auf der Tiefe und Flussfeld bestimmt werden konnten, beträgt mehr als 90 Prozent.

Die Oberfläche des unmarkierten Blattes wird nur teilweise rekonstruiert (Abbildung 8.1), das rekonstruierte Geschwindigkeitsfeld ist ähnlich schlecht und nicht dargestellt. Im Besonderen sei darauf hingewiesen, dass im Falle des markierten Blattes der zentrale Blattbereich geschlossen bestimmt werden kann, dieser Bereich ist für Wuchsratenbestimmungen besonders wichtig. Testsequenzen über 15 Stunden zeigen, dass selbst starke Blattbewegungen und -neigungen aufgelöst werden können. In beiden Fällen wurde ein 480×480 Pixel großer Bildausschnitt der ursprünglichen 480×640 Pixel großen Bilder ausgewertet.

Zypressenblatt

Im zeitlichen Abstand von 120 Sekunden wurde ein frei bewegliches Zypressenblatt aufgenommen, die Breite des Bildausschnitts beträgt etwa 1,5 cm. Dies geschah zum einen mit einem unbehandelten, zum anderen mit einem besprühten Blatt. Die Ergebnisse sind auf dem markierten Blatt deutlich besser: Das vorgestellte Verfahren liefert bei dem markierten Blatt fast überall Werte. Im Falle des Zypressenblattes sind die Unterschiede allerdings nicht so dramatisch wie in anderen vorgestellten Fällen: Das Zypressenblatt besitzt eine ausgeprägte Oberflächentextur, diese macht einen hohen Füllfaktor möglich. Trotzdem tauchen auf dem unmarkierten Blatt Lücken auf. In beiden Fällen wurde ein

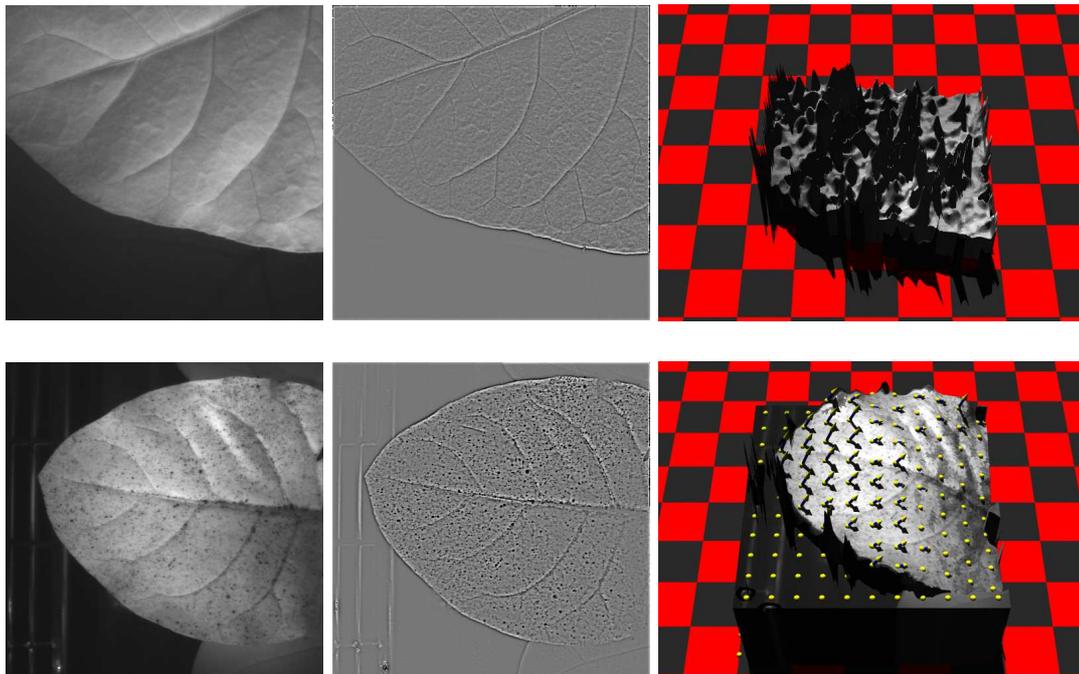


Abbildung 8.1: Rekonstruktion eines Tabakblattes: (**oben**) Unmarkiertes Tabakblatt: Originalbild, hochpassgefiltertes Bild und gerenderte Ansicht der rekonstruierten Blattoberfläche. Die Rekonstruktion der Oberfläche ist nur in Regionen gut. (**unten**) Markiertes Tabakblatt: Originalbild, hochpassgefiltertes Bild und gerenderte Ansicht der rekonstruierten Blattoberfläche mit berechnetem Geschwindigkeitsfeld. Die Markierung mit Farbtropfen verbessert die Rekonstruktion dramatisch.

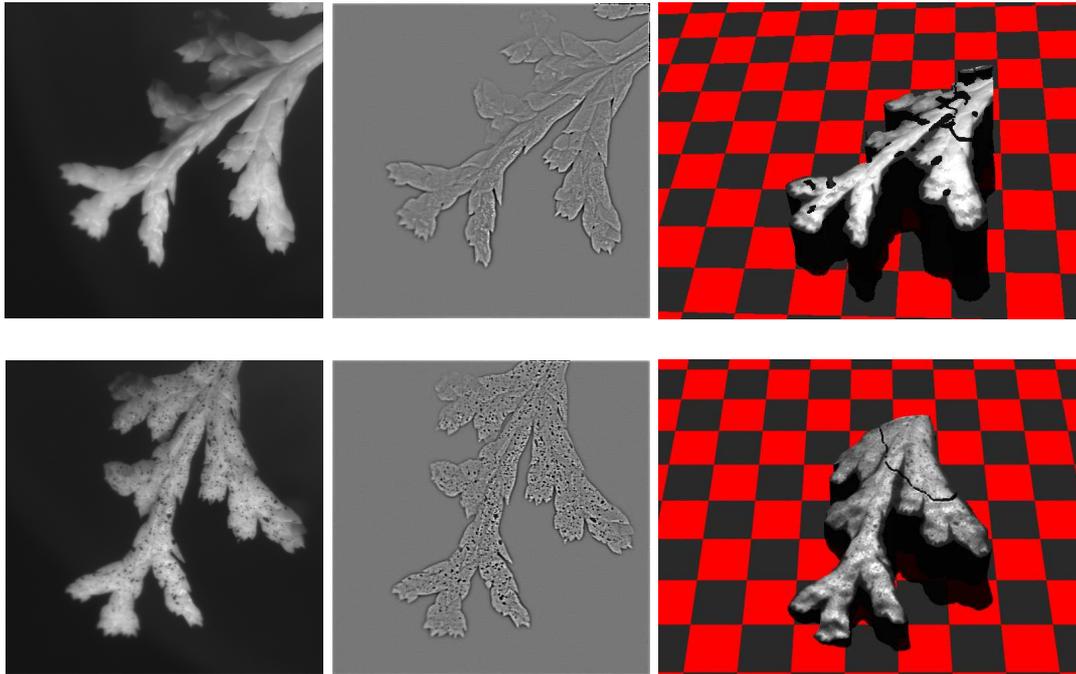


Abbildung 8.2: Zypressenblatt: (*oben*) Nichtmarkiertes Zypressenblatt. Originalbild, hochpassgefiltertes Bild und eine gerenderte Ansicht der rekonstruierten Blattoberfläche für das nichtmarkierte Blatt. (*unten*) Markiertes Zypressenblatt. Originalbild, hochpassgefiltertes Bild und eine gerenderte Ansicht der rekonstruierten Blattoberfläche für das markierte Blatt.

480×480 Pixel großer Bildausschnitt der ursprünglichen 480×640 Pixel großen Bilder ausgewertet. Die Geschwindigkeitsfelder werden nicht gezeigt, da das Blatt während der Aufnahmesequenz nicht sichtbar gewachsen ist (Abbildung 8.2).

Kartoffel

Im zeitlichen Abstand von 120 Sekunden wurde eine in Hydrokultur wachsende Kartoffel aufgenommen, ihr Durchmesser beträgt etwa 2 cm (Abbildung 8.3). Dies geschah zuerst mit der unbehandelten, dann mit der besprühten Kartoffel. Die Ergebnisse sind auf der markierten Kartoffel dramatisch besser: An allen besprühten Flächen wurde die Oberfläche deutlich rekonstruiert, die unmarkierte Kartoffel dagegen hat so wenig Struktur und reflektiert so stark, dass in fast keinem Bildbereich die Tiefe rekonstruiert werden kann. Insbesondere sei auf die gelungene Rekonstruktion auch stark geneigter Teilflächen hingewiesen, die Halbkugelstruktur des sichtbaren Teils der Kartoffel ist deutlich sichtbar. In beiden Fällen wurde ein 480×480 Pixel großer Bildausschnitt der ursprünglichen 480×640 Pixel großen Bilder ausgewertet. Die Breite des Bildausschnitts beträgt etwa 5 cm. Die Geschwindigkeitsfelder werden nicht gezeigt, da die Kartoffel während der Aufnahmesequenz nicht sichtbar gewachsen ist.

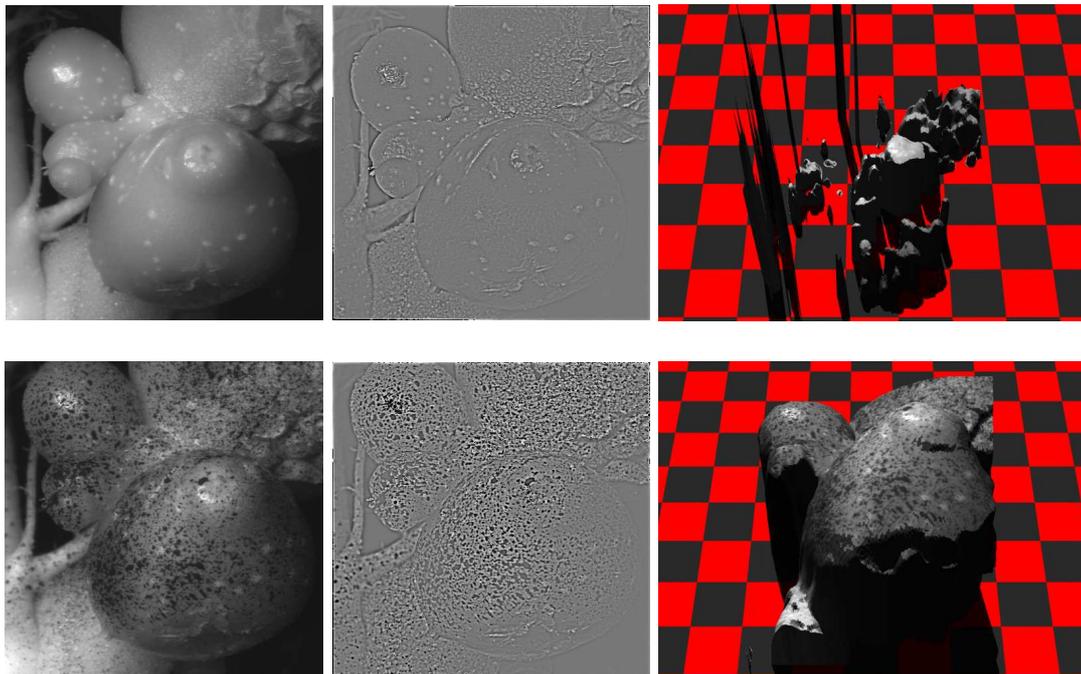


Abbildung 8.3: Kartoffel: (**oben**) Nichtmarkierte Kartoffel. Originalbild, hochpassgefiltertes Bild und gerenderte Ansicht der rekonstruierten Oberfläche für die unmarkierte Kartoffel. (**unten**) Markierte Kartoffel: Original- und hochpassgefiltertes Bild, daneben eine gerenderte Ansicht der rekonstruierten Oberfläche für die markierte Kartoffel.

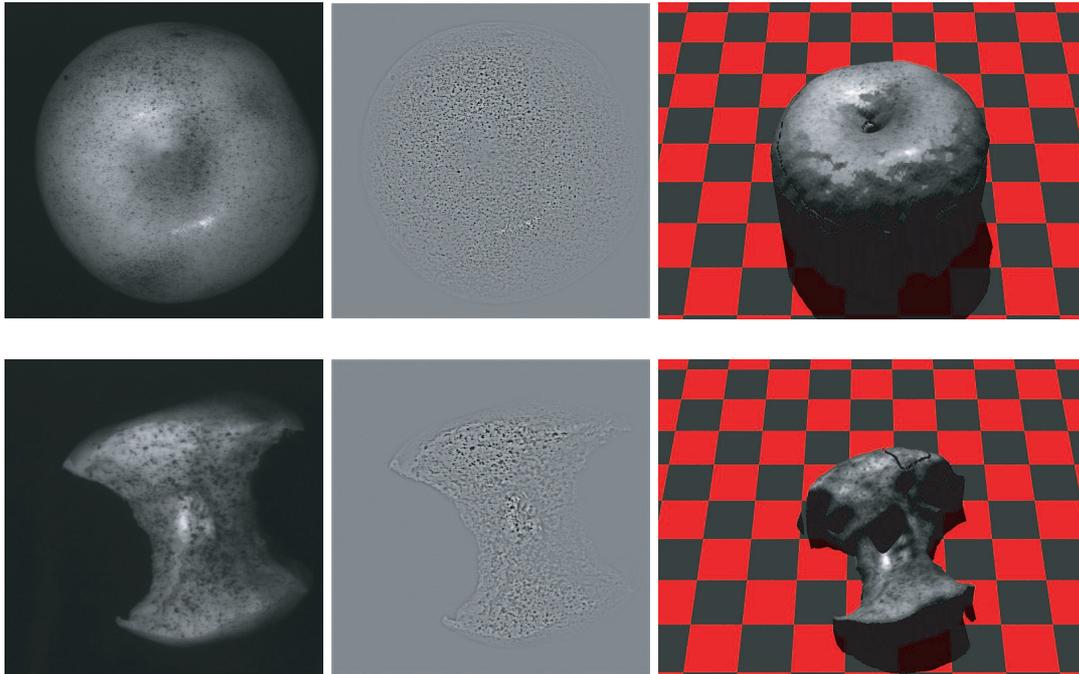


Abbildung 8.4: Apfel: (*oben*) Vor dem Essen. Dargestellt sind ein Originalbild, das hochpassgefilterte Bild und eine 3D-Rekonstruktion mit projiziertem Originalbild. (*unten*) Nach dem Essen. Der Durchmesser des Apfels beträgt etwas 7 cm.

Weitere Objekte

Früchte sind interessante botanische Untersuchungsobjekte, im Folgenden sind die Rekonstruktionen einiger gewölbter Oberflächen exemplarisch vorgestellt (Abbildung 8.4 und 8.5).

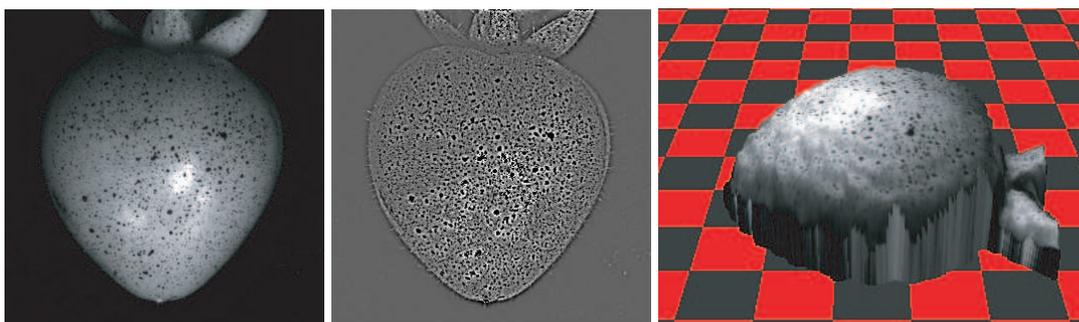


Abbildung 8.5: Kirschtomate: Dargestellt sind ein Originalbild, das hochpassgefilterte Bild und eine 3D-Rekonstruktion mit projiziertem Originalbild. Der Durchmesser der Tomate beträgt etwa 2 cm.

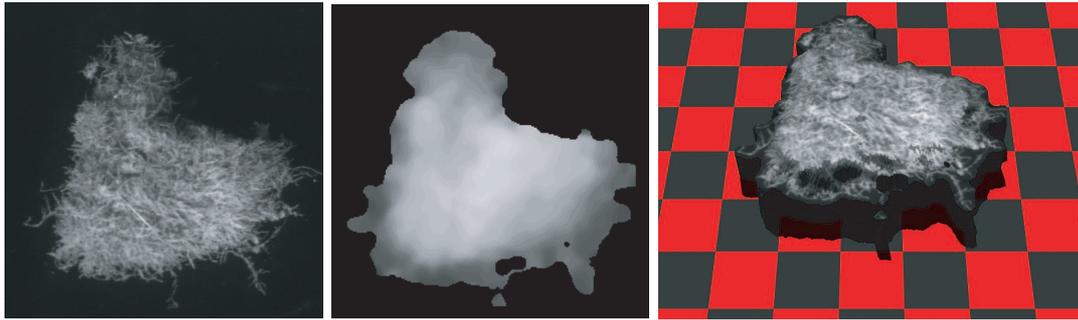


Abbildung 8.6: Moos: Originalbild, rekonstruiertes Tiefenbild und 3D-Visualisierung mit projiziertem Originalbild. Der gute Kontrast der faserartigen Moosstrukturen lässt auch ohne Markierung eine gute Rekonstruktion zu. Der Durchmesser der Probe beträgt etwa 5cm.



Abbildung 8.7: Ficus benjamini: Originalbild, rekonstruiertes Tiefenbild und 3D-Visualisierung mit projiziertem Originalbild. Das Blattwerk erscheint als geglättete Oberfläche. Durch den guten Helligkeitskontrast im Bild ist eine Rekonstruktion auch ohne Markierung möglich. Der Bilddurchmesser beträgt etwa 40 cm.

8.1.3 Nichtkontinuierliche Oberflächen

Die im letzten Abschnitt vorgestellten Objekte haben alle kontinuierliche Oberflächen, das heißt der Verlauf ihres Höhenprofils zeigt keine Sprünge. Die Oberflächen von pflanzlichen Strukturen wie Moos oder dem Kronendachbereich eines Baumes sind nicht stetig strukturiert: Sie setzen sich aus getrennten Teilstrukturen (Moosfäden bzw. Blättern) zusammen, zwischen diesen gibt es Sprünge in den zugeordneten Tiefenwerten. Auf einer größeren Skala und bei ausreichend dichter Lage der Teilstrukturen erscheint die Oberfläche ihrer Gesamtheit relativ geschlossen. Dies sei anhand einiger Beispielobjekte illustriert (Abbildung 8.6, 8.7, 8.8 und 8.9).



Abbildung 8.8: *Inga sapinoides*: Originalbild, Tiefenbild und eine 3D-Rekonstruktion der rekonstruierten Oberfläche. Der Bildausschnitt zeigt einen etwa $1,5 \times 2$ Meter großen Bereich, die Entfernung beträgt etwa 8 Meter.

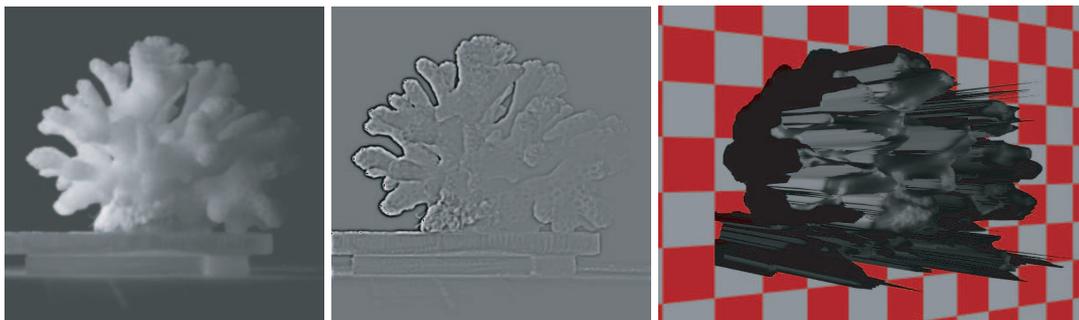


Abbildung 8.9: Koralle: Originalbild, hochpassgefiltertes Bild und 3D-Darstellung der rekonstruierten Oberfläche. Aufgrund der starken Tiefenunterschiede ist die Qualität der Rekonstruktion schlecht. Die Koralle ist etwa 5 cm hoch.

8.2 Wachstum von Pflanzenorganen

Wuchsratenmessungen sind von besonderem botanischen Interesse. Wie die Beispiele im letzten Kapitel zeigen lässt sich eine große Bandbreite an Pflanzenorganen in guter Qualität rekonstruieren. Langzeitmessungen sind aber aus messtechnischer Sicht nicht unproblematisch: Damit das Tiefenprofil und die Geschwindigkeitsfelder bestimmt werden können, muss die Eigenbewegung der Beobachtungsobjekte klein sein. Die Verschiebung der Objekte innerhalb eines Zeitschrittes sollte im Bild nicht größer sein als etwa ein Pixel.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Wuchsratenmessungen wurden am Biosphere 2 Center in Oracle, Arizona gemacht. Untersucht wurden Kakteen (*Opuntia phaeacantha*) und Feigen. Im Falle der Kakteen wurden Kladodien und Früchte untersucht. Es sei betont, dass die vorgestellten Experimente keine systematischen botanischen Messungen sind: Sie sollen exemplarisch das Funktionieren der neuen Methode zeigen und eine Abschätzung der Möglichkeiten erlauben.

8.2.1 Wuchsratenmessungen an Kakteen

Kakteen zeigen ein von den meisten höheren Pflanzen abweichendes Stoffwechselverhalten. Der Crassulacean acid metabolism (CAM) unterscheidet sich in Photosynthese- und Atmungsverhalten von den Prozessen die in C_3 - oder C_4 -Pflanzen ablaufen. Über die Wuchsdynamik von CAM-Pflanzen ist nichts bekannt, die zeitliche Auflösung der konventionellen Methoden reicht nicht aus um zu unterscheiden ob sich der temporale Verlauf des CAM in der Ausdehnung des Pflanzengewebes widerspiegelt. CAM-Pflanzen benötigen nur einen Bruchteil des Wassers den C_3 - oder C_4 -Pflanzen unter vergleichbaren Bedingungen verbrauchen. Deshalb findet man CAM typischerweise in trockenen Wüstengebieten oder halbtrockenen Gebieten mit saisonalen Niederschlägen.

Bei den untersuchten CAM-Pflanzen handelt es sich um Opuntien, einer Unterfamilie von Kakteen (Abbildung 8.10). Opuntien sind mehrästig, wie bei Bäumen entspringt jeder Ast aus einem anderen. Diese Kladodien, die Äste von Opuntien, erinnern an dicke, fleischige Blätter. Sie besitzen eine harte Haut mit wachsartiger Oberfläche, dies reduziert den Flüssigkeitsverlust durch Verdunstung. Die Stacheln der Kakteen haben sich aus Blättern entwickelt und sind bei den untersuchten jungen Kladodien noch weich.

Kaktuskladodien

Im Rahmen einer botanischen Diplomarbeit wurde das Wuchsverhalten von Kaktuskladodien untersucht [26]. Dabei stand unter Anderem eine Fragestellung im Vordergrund: Zeigt das Wuchsverhalten von *Opuntia*-Kladodien einen Tagesgang? Die Wuchsratenmessungen wurden mit dem in Kapitel 2.1 beschriebenen 2D-Verfahren durchgeführt. In diesem Abschnitt werden die mit dem 3D-Verfahren erhaltenen Resultate vorgestellt. Die Experimente wurden an *Opuntia phaeacantha* durchgeführt.

Die untersuchten Kladodien wurden auf dem Gelände des Biosphere 2 Center gesammelt und nach einer zweiwöchigen Ruhephase in Töpfe eingepflanzt. Dann wurden die Pflanzen in eine Klimakammer gestellt. Diese hatte eine Helligkeitsperiode von 12 Stunden (7:00 bis 19:00 Uhr) und eine Dunkelperiode von ebenfalls 12 Stunden (19:00 bis 7:00 Uhr). Die Temperatur betrug tagsüber 25 °C



Abbildung 8.10: Untersuchte Kakteen: (*links*) *Opuntia engelmannii* (*rechts*) Nahaufnahme einer Opuntie, mit Kladodien und Blüten.

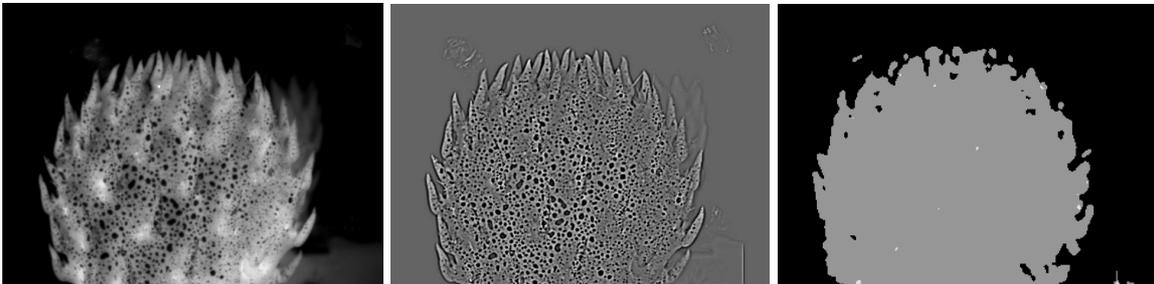


Abbildung 8.11: Kladodien: (*links*) Originalbild des mit Farbtröpfchen markierten Kladodiums. (*mitte*) Hochpassgefiltertes Bild (*rechts*) Bild des Ranges, an grauen Bereichen konnte rekonstruiert werden.

und nachts $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, die relative Luftfeuchtigkeit betrug während der gesamten Zeit 30 %. Die Beleuchtung der Pflanzen erfolgte durch Leuchtstoffröhren mit einer Intensität von $320 - 350\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in mittlerer Pflanzenhöhe. Die Pflanzen wurden zweimal wöchentlich mit demineralisiertem Wasser gegossen. Zur Verbesserung der Kontraste auf der Oberfläche des Kladodiums wurde diese mit dem Sprühmarkerverfahren behandelt (Anhang C).

Ein junges Kladodium (Durchmesser etwa 2 cm) wurde über einen Zeitraum von 65 Stunden aufgenommen. Abbildung 8.11 zeigt ein Originalbild der Sequenz, ein hochpassgefiltertes Bild und ein Bild des Ranges. Die Hochpassfilterung erfolgte durch Subtraktion eines mit einer Gaussmaske der Breite 15 Pixel geglätteten Originalbildes von dem Originalbild selbst. Das Rangbild zeigt den Rang des Strukturensors, dabei stehen graue Regionen für Bereiche, in denen Tiefe und Fluss bestimmt werden konnten. In schwarzen und weißen Gebieten reichen die Strukturen im Bild nicht für eine Parameterbestimmung aus.

Die berechneten Fluss- und Tiefenwerte sind in Abbildung 8.12 und 8.13 dargestellt. In den Tiefenbildern lassen sich die auf den Kladodien sitzenden Stacheln gut erkennen. Die Geschwindigkeitsfelder in x- und y-Richtung zeigen deutliche Gradienten. Die Stacheln haben konstante Geschwindigkeiten, sie erscheinen in den Profilen als Plateaus.

In Abbildung 8.14 ist der örtliche Verlauf der Wachsrates während eines Zeitpunktes grauwertco-

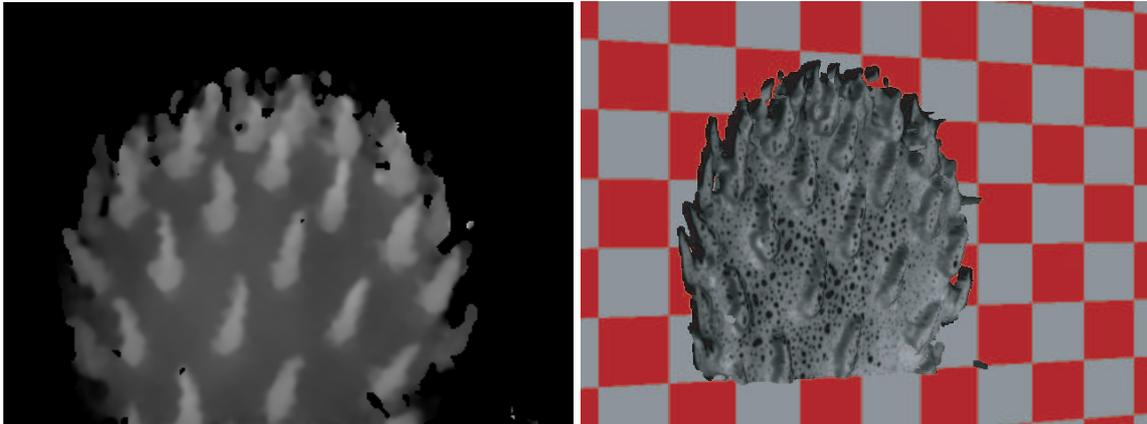


Abbildung 8.12: Tiefenbestimmung an *Opuntia*-Kladodium: **(links)** Berechnetes Tiefenbild. **(rechts)** 3D-Visualisierung mit projiziertem Originalbild.

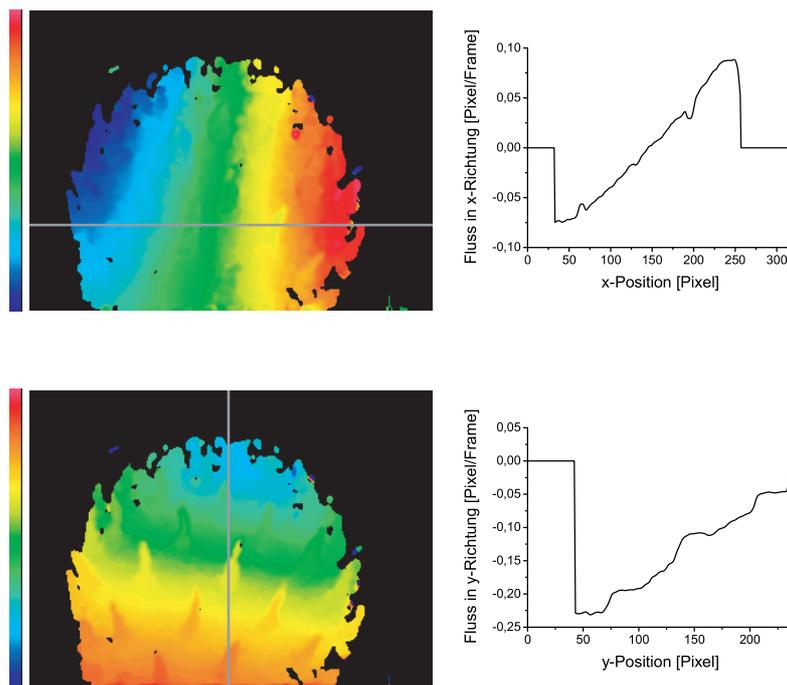


Abbildung 8.13: Geschwindigkeitsfelder des *Opuntia* Kladodiums: **(oben)** Bild der detektierten Verschiebungen in x -Richtung in Pixel/Frame (Falschfarbendarstellung im Bereich $[-0,1:0,1]$) und Profil der markierten Zeile. **(unten)** Darstellung der Verschiebungen in y -Richtung (Falschfarbendarstellung im Bereich $[-0,3:0]$) und Profil der markierten Spalte. Wie die Geschwindigkeitsverläufe zeigen, können auch regionale Dynamiken mit dem Verfahren aufgelöst werden: Die Stacheln der Kladodien sind in den Verschiebungsbildern deutlich zu erkennen. Da sie selbst nicht wachsen, erscheinen sie mit konstanter Geschwindigkeit, d.h. in einer Farbe. In den Profilen erscheinen sie als Plateaus.

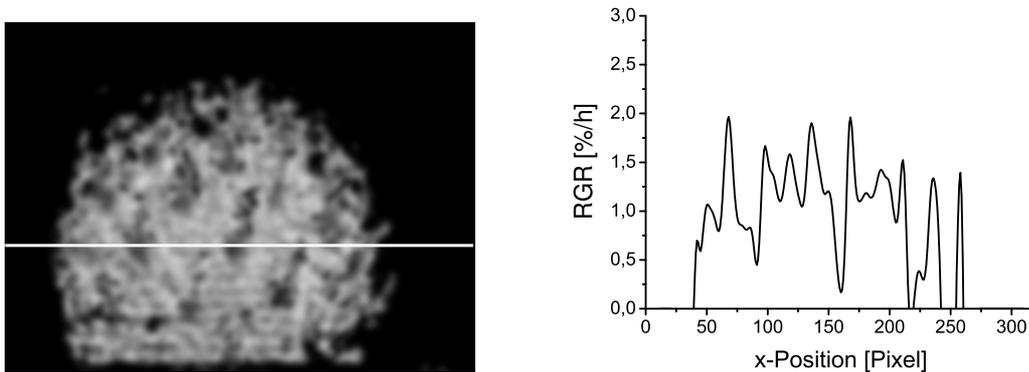


Abbildung 8.14: Örtliche Auflösung der Wachsrates: (*links*) Darstellung der berechneten Wachsrates in Grauwerten in [%/h]. Die Blätter erscheinen dunkel: Sie wachsen nicht und haben dementsprechend eine Wachsrates von Null. Das Verfahren lässt eine Auflösung regionaler Wachsratesbereiche zu. (*rechts*) Zeilenprofil der markierten Zeile. Die Wachsrates ist im Bereich der Blätter deutlich kleiner als auf dem restlichen Kladodium.

diert dargestellt. Dunkle Stellen stehen für geringes Wachstum, helle Stellen für stärkeres Wachstum. Im Wachsratesbild lassen sich die Stacheln des Kladodiums deutlich erkennen: Da sie selbst nicht wachsen, erscheinen sie im Wachsratesbild als dunkle Stellen bzw. als Minima im Profil. Das Verfahren ist also genau genug für die Auflösung lokaler Phänomene.

Die Ergebnisse zur Langzeitmessung von Wachsrates bei Kladodien sind in Abbildung 8.15 dargestellt. Das Kladodium wurde über 65 Stunden aufgenommen und die gesamte Sequenz ausgewertet. Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Wachsrates wurde diese im Zentralbereich des Kladodiums gemittelt berechnet: In einem 100×100 Pixel großen Bereich wurde auf allen erfolgreich rekonstruierten Positionen die mittlere Wachsrates berechnet. Der Verlauf der Wachsrates zeigt einen deutlichen Tagesgang. Das Kladodium wächst hauptsächlich nachts, die Wachsrates erreicht gegen Ende der Dunkelphase ihr Maximum und fällt während des Tages ab. Am späten Nachmittag wird die Wachsrates sogar negativ, das Kladodium schrumpft. Die auf dem gleichen Bereich gemittelte z-Geschwindigkeit der Oberfläche (d.h. die Geschwindigkeit des Kladodiums in Kamerarichtung) zeigt ebenfalls einen Tagesgang, wenn auch schwächer als die mittlere Wachsrates.

Die Ergebnisse der hier beschriebenen Messungen decken sich mit den per 2D-Verfahren gewonnenen Erkenntnissen. Da die Kladodien bis auf die Blätter eben sind und sich während der Aufnahmen kaum bewegen erfüllen sie die Bedingung der fronto-parallelen Objektlage in fester Tiefe gut.

Kaktusfrüchte

Neben den Kladodien bieten sich die Früchte der Opuntien als Untersuchungsobjekte an: Sie zeigen, ähnlich wie die Kladodien, starkes Wachstum. Die Experimente wurden ebenfalls in Klimakammern durchgeführt, die Rahmenbedingungen entsprechen denen bei den Kladodienaufnahmen: Die Klimakammer hatte eine Helligkeitsperiode von 12 Stunden (7:00 bis 19:00 Uhr) und eine Dunkelphase von ebenfalls 12 Stunden (19:00 bis 7:00 Uhr). Die Temperatur betrug tagsüber 25°C und nachts 10°C , die relative Luftfeuchtigkeit betrug während der gesamten Zeit 30 %. Die Beleuchtung der Pflanzen erfolgte durch Leuchtstoffröhren mit einer Intensität von $320 - 350 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in mittlerer

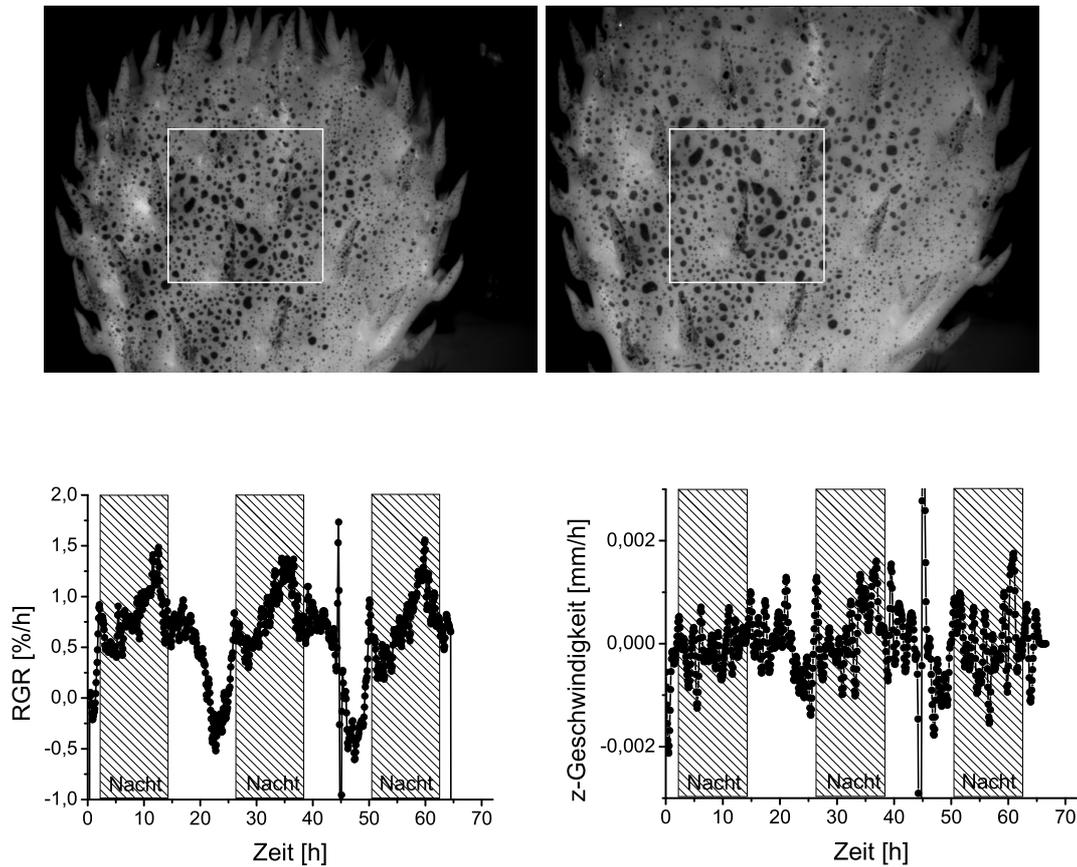


Abbildung 8.15: Zeitliche Auflösung der Wachsrates und z -Geschwindigkeit: (**oben**) Originalaufnahmen zu Beginn und Ende der ausgewerteten Sequenz. (**unten links**) Wachsratenverlauf über 72 Stunden. Deutlich ist der Tagesgang im Wachsratenverlauf erkennbar: Während der Dunkelphasen nimmt die Wachsrates zu, um dann während des Tages wieder abzufallen. Gegen Ende des Tages fällt sie sogar unter Null, das Kladodium schrumpft. (**unten rechts**) Verlauf der mittleren z -Geschwindigkeit: Die Bewegung des Kladodiums in Richtung der Kamera ist fast Null. Positive Geschwindigkeiten zeigen in Kamerarichtung. Ein Tagesgang zeichnet sich ab, er korrespondiert mit dem Wachsratenverlauf, d.h. die Geschwindigkeit rührt von den Größenschwankungen her.

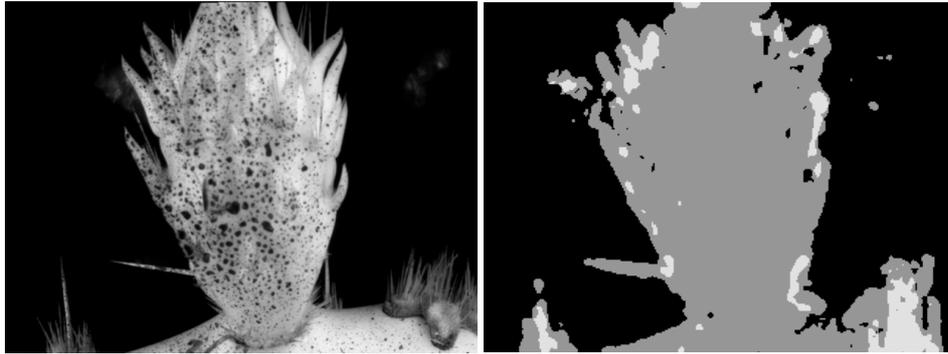


Abbildung 8.16: *Opuntia-Frucht: (links) Ein Originalbild. (rechts) Ein Bild des Ranges. Graue Bereiche stehen für eine gelungene Tiefen- und Flussbestimmung.*

Planzenhöhe. Die Pflanzen wurden zweimal wöchentlich mit demineralisiertem Wasser gegossen. Zur Verbesserung der Kontraste auf der Oberfläche der Frucht wurde diese mit dem Sprühmarkerverfahren behandelt (Anhang C).

Die Oberfläche der Frucht ist deutlich sphärischer als die Oberfläche des Kladodiums. Wie Abbildung 8.16 zeigt kann die Tiefe und der Fluss auf der besprühten Oberfläche gut berechnet werden. Der örtliche Verlauf der Geschwindigkeiten zeigt deutliche Gradienten (Abbildung 8.17), er ist aber nicht so glatt wie im Fall der Kladodien. Dies liegt wahrscheinlich an der Oberfläche der Früchte: Sie ist deutlich zerklüfteter als die der Kladodien (Abbildung 8.18).

Die Ergebnisse zur Langzeitmessung von Wuchsraten bei *Opuntia*-Früchten sind in Abbildung 8.19 dargestellt. Die Frucht wurde über 65 Stunden aufgenommen und die gesamte Sequenz ausgewertet. Zur Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der Wuchsrates wurde diese im Zentralbereich der Frucht gemittelt berechnet: In einem 50×50 Pixel großen Bereich wurde auf allen erfolgreich rekonstruierten Positionen die mittlere Wuchsrates berechnet. Der Verlauf der Wuchsrates zeigt einen deutlichen Tagesgang. Das Kladodium wächst hauptsächlich nachts, die Wuchsrates erreicht gegen Ende der Dunkelphase ihr Maximum und fällt während des Tages ab. Die im gleichen Bereich gemittelt berechnete mittlere z -Geschwindigkeit der Oberfläche (d.h. die Geschwindigkeit der Frucht in Kamerarichtung) zeigt ebenfalls einen Tagesgang, wenn auch deutlich schwächer als die mittlere Wuchsrates.

8.2.2 Wuchsratesmessungen an Feigen

Das Biosphere 2 Center beherbergt eine Reihe von Biomen mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen. Der sogenannte Wintergarten wird nicht klimatisiert, die Temperatur schwankt also im Laufe von 24 Stunden deutlich: Tagsüber sind die Temperaturen über 25°C , während der Nacht fallen sie auf unter 10°C . Die Bewässerung erfolgt normalerweise zwei Mal wöchentlich über eine Sprinkleranlage, während der mehrtägigen Messung wurde diese ausgeschaltet.

Unter anderem befindet sich im Wintergarten ein Feigenbaum. Da dieser relativ leicht zugänglich ist, wurden Messungen an einer Feige durchgeführt. Mit ihrer gewölbten Oberfläche ist sie ein interes-

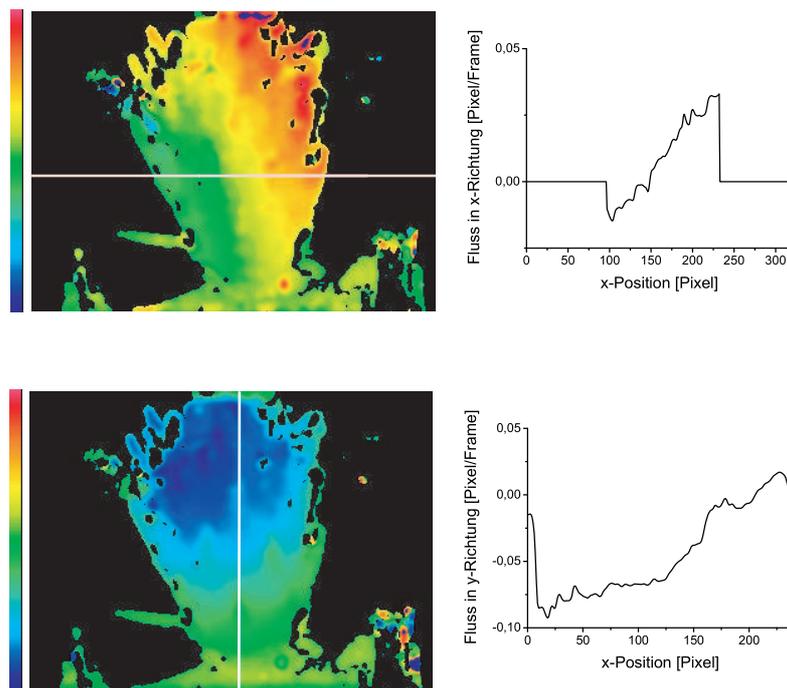


Abbildung 8.17: Geschwindigkeitsfelder auf *Opuntia*-Frucht: (**oben**) Bild der x -Geschwindigkeit in Pixel/Frame (Falschfarbendarstellung im Bereich $[-0,1;0,1]$) und Profil der markierten Zeile. (**unten**) Bild der y -Verschiebung in Pixel/Frame (Falschfarbendarstellung im Bereich $[-0,1;0,05]$) und Profil der markierten Spalte. Wie die Geschwindigkeitsverläufe zeigen auch bei Früchten regionale Dynamiken aufgelöst werden: Die Blätter der Früchte sind in den Verschiebungsbildern zu erkennen, wenn auch nicht so deutlich wie bei den Kladodien.

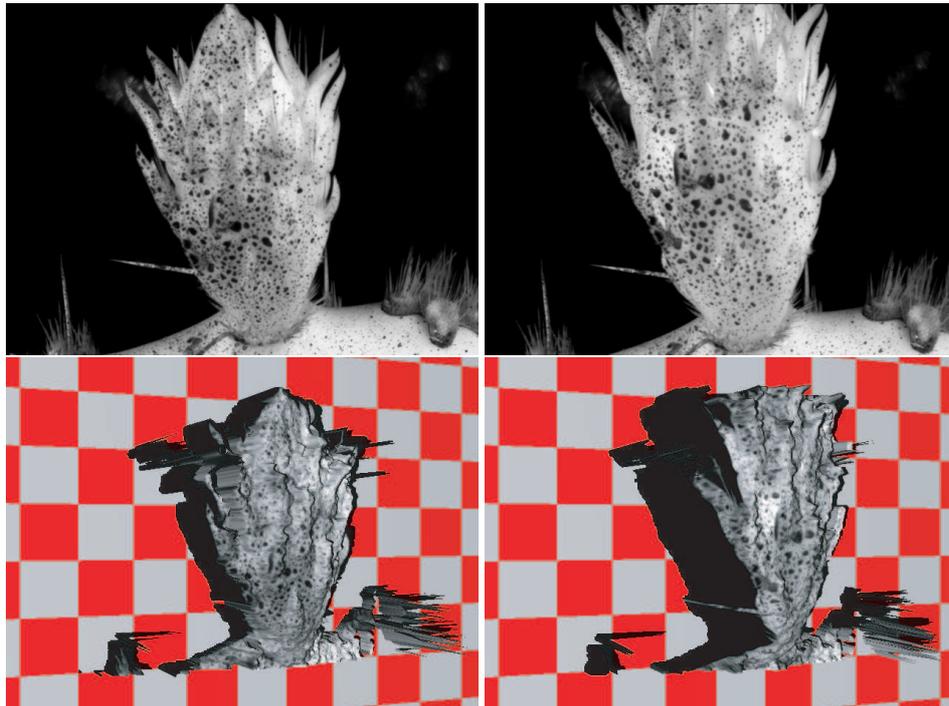


Abbildung 8.18: *Opuntia-Frucht: (oben) Originalbild zu Beginn und Ende der Sequenz. (unten) 3D-Visualisierungen der rekonstruierten Oberflächen mit projizierten Originalbildern.*

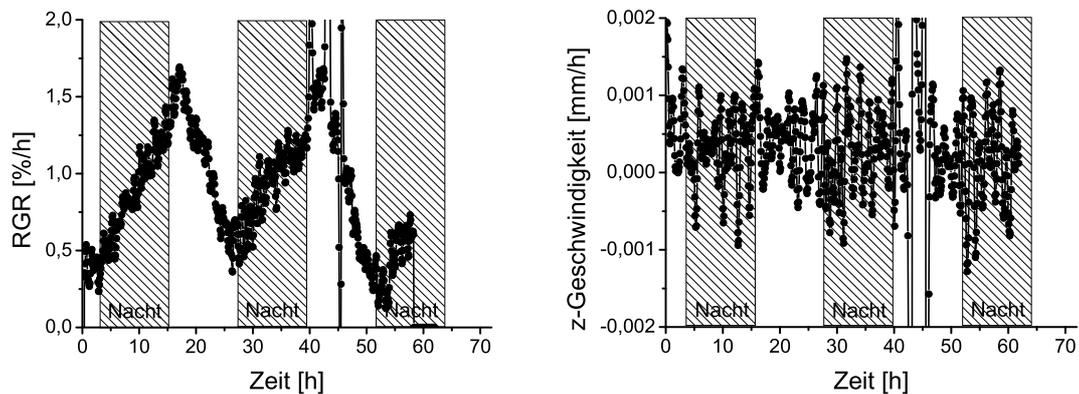


Abbildung 8.19: *Wuchsrates und z-Geschwindigkeit der Opuntia Frucht: (links) Wuchsratenverlauf über 72 Stunden: Deutlich ist der Tagesgang im Wuchsratenverlauf erkennbar: Während der Dunkelphasen nimmt die Wuchsrates zu, um dann während des Tages wieder abzufallen. Der RGR-Verlauf entspricht dem des Kladodiums. (rechts) Verlauf der mittleren z-Geschwindigkeit: Die Bewegungen der Frucht in Richtung der Kamera ist fast Null. Positive Geschwindigkeiten zeigen in Kamerarichtung. Ein Tagesgang zeichnet sich ab, er korrespondiert mit dem Wuchsratenverlauf, d.h. die Geschwindigkeit rührt von den Größenschwankungen her.*

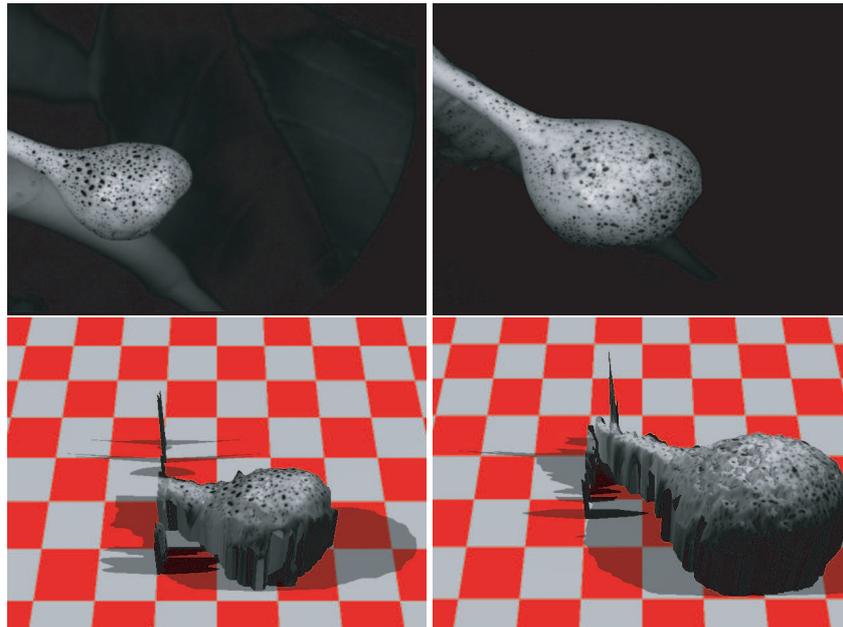


Abbildung 8.20: Feigenfrucht: (*oben*) Originalbilder der Feige zu Beginn und Ende der Sequenz. (*unten*) Zugehörige 3D-Visualisierungen der rekonstruierten Oberflächen mit projizierten Originalbildern.

santes Untersuchungsobjekt für die 3D-Methode (Abbildung 8.20). Um Eigenbewegungen der Feige zu minimieren, wurde der Ast an dem sie hing mittels Klebeband am Messaufbau fixiert. Die Feige wurde mit Infrarotdioden zusätzlich beleuchtet. Zur Verbesserung der Kontraste auf der Oberfläche der Frucht wurde diese mit dem Sprühmarkerverfahren behandelt (Anhang C). Dabei wurde eine unerwartete experimentelle Schwierigkeit deutlich: Wie in weiten Teilen des Biosphere 2 Centers lebt auch im Wintergarten eine gesunde Kakerlakenpopulation. Sie wurden ihrem Ruf als Allesfresser gerecht und vertilgten über einige Stunden einen Großteil der Wasserfarbmarkierung.

Die Wuchsratenmessung lief über insgesamt fünf Tage, an zwei Tagen (1. und 2. Tag) war der gesamte Aufbau mit einer Plane abgedeckt. Deutlich ist im Verlauf der örtlich gemittelten Wuchsrates ein Tagesgang zu erkennen (Abbildung 8.21): Gegen 12 Uhr beginnt die Wuchsrates abzufallen, gegen 15 Uhr ist ein Minimum erreicht und die Wuchsrates steigt wieder an. Gegen 18 Uhr ist der ursprüngliche Wert wieder erreicht.

8.3 Kronendachrekonstruktion

Die vorgestellte Methode kann das Blattwerk von Pflanzen als geglättete Oberfläche rekonstruieren, vorausgesetzt die Blätter liegen dicht genug. Dies wird durch Testaufnahmen belegt (vergleiche Kapitel 8.1.3). Während des Aufenthaltes am Biosphere 2 Center entstand Kontakt mit der Arbeitsgruppe von Joe Berry, Stanford, Kalifornien. Unter anderem arbeitet diese Gruppe an der Entwicklung eines Lichtmodells für Kronendächer. Um Daten über den Lichteinfall in Kronendachbereiche zu erhalten, wurde versucht, eine Rekonstruktion des Kronendaches des Regenwaldbioms im Biosphere 2 Center

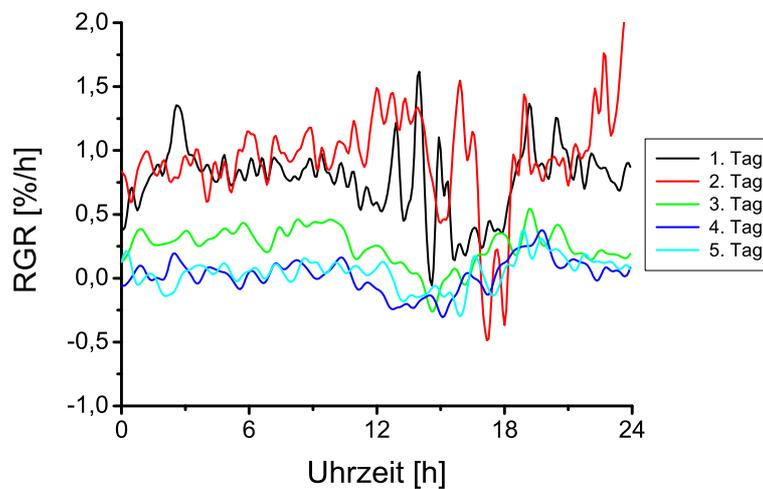


Abbildung 8.21: Wuchsratenverlauf bei Feige: Dargestellt ist die räumlich gemittelte relative Wuchsrate der Feige über 5 Tage. Am 1. und 2. Tag war die Feige und der Umgebungsbereich zur Beschattung mit einer Plane abgedeckt. An allen fünf Messtagen ist ein deutlicher Tagesgang der Wuchsrate erkennbar. Gegen 12 Uhr beginnt die Wuchsrate abzufallen, gegen 15 Uhr ist ein Minimum erreicht und die Wuchsrate steigt wieder an. Gegen 19 Uhr ist der ursprüngliche Wert wieder erreicht.

zu erhalten (Abbildung 8.22). In Kombination mit einem tageszeitabhängigen Sonnenstandsmodell soll dann simuliert werden, wieviel Licht zu welcher Tageszeit welchen Teil des Kronendaches erreicht.

Versuche zur Oberflächenrekonstruktion sind schon erfolglos gemacht worden: Der Einsatz eines Laserscanners wurde versucht, es gelang aber nicht die Reflektionssignale sinnvoll in 3D-Information umzuwandeln, da das Kronendach nicht dicht genug war (Dr. Uwe Rascher, mündlich). Eine manuelle Verlaufsbestimmung war geplant, die Durchführung scheiterte aber am enormen Arbeitsaufwand: Die Grundfläche des Bioms beträgt 1800 qm. Prinzipiell ist der Kronendachbereich zwar über das Innengerüst des Bioms erreichbar, das Gewinnen von räumlicher Information ist aber sehr aufwendig: Durch das Ablassen von Massbändern lässt sich der Abstand zum Gerüst bestimmen, für eine detailliertere Rekonstruktion sind hunderte von Messwerten notwendig. Außerdem kann auf diese Weise nur von oben gemessen werden.

Vor Benutzung des vorgestellten Verfahrens wurden die Messungen mit einem vereinfachten manuellen Stereosystem gemacht: Von dem Absatz aus, der zwischen der zweiten und dritten Pyramidenstufe das Gebäude umläuft, wurde eine Reihe von Aufnahmen gemacht. Durch Triangulation wurde dann die Position von charakteristischen Punkten des Kronendaches bestimmt. So ergab sich eine Rekonstruktion aus etwa 50 Oberflächenpunkten, allerdings lag keiner dieser Punkte im Zentralbereich des Bioms.

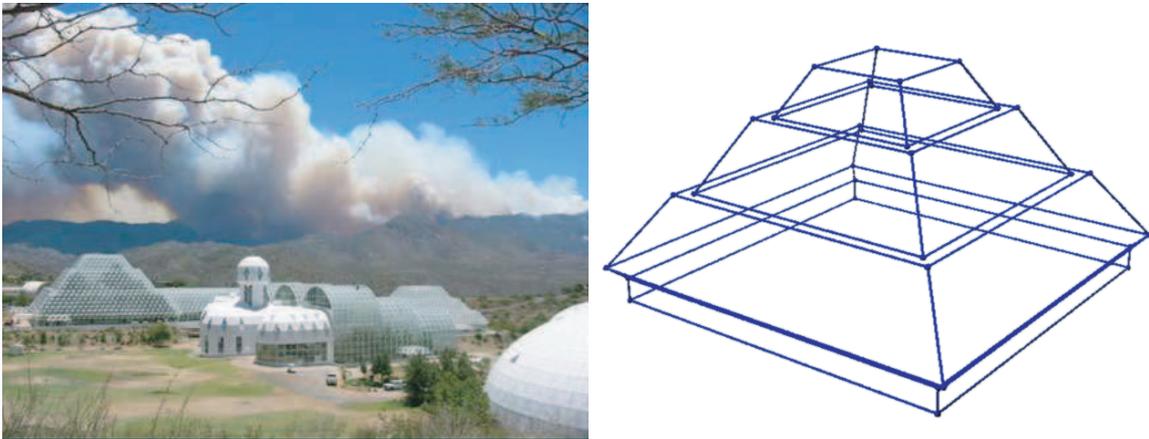


Abbildung 8.22: Regenwaldbiom: (*links*) Im linken Teil des Bildes ist das pyramidenförmige Gebäude zu erkennen. Die Messplattform befand sich im Innengerüst des Bioms, auf der dem Betrachter zugewandten Westseite. (*rechts*) Aus den Planzeichnungen der Architekten wurde das Biom als Gitter modelliert, in dieses werden die 3D-Messwerte eingebettet.



Abbildung 8.23: Panorama-Innenansicht des Regenwaldbioms. Die Abbildung ist aus drei überlappenden Teilaufnahmen zusammengesetzt. Die Aufnahmen wurden von der Messplattform gemacht, der große Baum im rechten Bildteil wächst in der Südostecke des Bioms. Der horizontale Blickwinkel beträgt etwa 110 Grad.

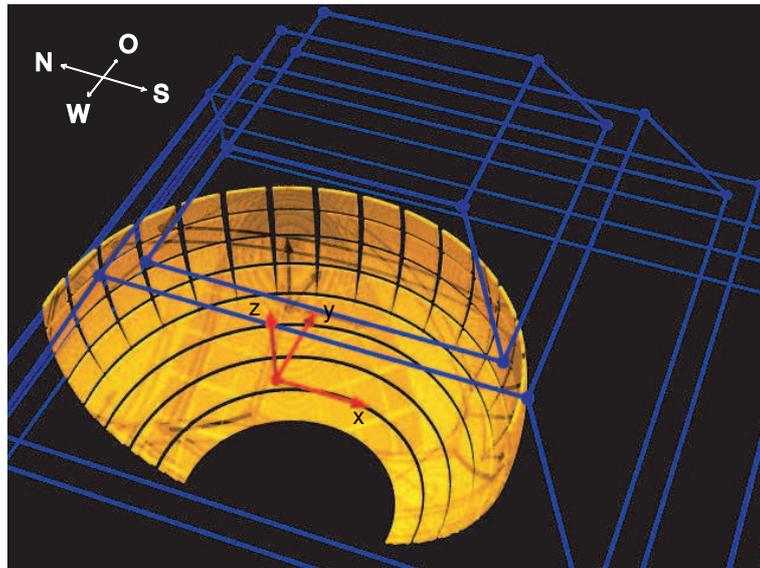


Abbildung 8.24: Schematische Anordnung der Teilbilder: Dargestellt sind 120 Einzelpositionen die in die Rekonstruktion des Kronendaches eingegangen sind. Je weiter man sich dem Südpol nähert, desto weiter überlappen die Teilrekonstruktionen einander. Die Lücken zwischen äquatornahen Teilbildern resultieren aus dem Abschneiden der Bildränder zur Vermeidung von Randeffekten. Der Ursprung des Koordinatensystems kennzeichnet die Position des Kameraarms.

8.3.1 Bildaufnahme

Unter Benutzung des in Kapitel 4 beschriebenen Verfahrens zur Rekonstruktion ausgedehnter Oberflächen wurde nun eine 3D-Rekonstruktion des Kronendaches mit deutlich höherer Auflösung gemacht: Ein drehbarer Kameraarm erlaubt die Einsicht in einen weiten Raumwinkelbereich. Die Teilrekonstruktionen der einzelnen Bereiche werden dann zu einer Gesamtoberfläche zusammengesetzt.

Die zur Aufnahme der Bilder notwendige Apparatur wurde auf einer klimatisierten Plattform im Innengerüst installiert (vergleiche Kapitel 6.2.1). Die Position der auf den drehbaren Arm montierten Kamera wird als Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems definiert. Es wurden insgesamt 140 Einzelpositionen aufgenommen, davon sind 122 in die endgültige Oberflächenrekonstruktion eingegangen. Der rekonstruierte Raumwinkelbereich beträgt horizontal etwa 180 Grad, vertikal etwa 75 Grad. Auf diese Weise konnte ca. 90 Prozent des Kronendaches erfasst werden (Abbildung 8.24). Um Randeffekte in den Tiefenbildern auszuschließen, wurde in diesen ein 20 Pixel breiter Rand gelöscht.

8.3.2 Ausgangsbilder und Teilrekonstruktionen

Die Entfernung der aufgenommenen Pflanzen zur Kamera lag zwischen 5 und 30 Metern. Für die notwendige Struktur der Pflanzenoberflächen sorgen vor allem die Blätter. Deren Größe in den Bildern unterscheidet sich stark, abhängig von Pflanzenart und Entfernung (Abbildung 8.25). Bei dichter Lage der Blätter und guter Beleuchtung kann aber für einen großen Teil des Bildes die entsprechende Tiefe bestimmt werden.

Das Innere des Regenwaldbioms enthält neben Pflanzen noch eine Reihe weiterer Strukturen: Ne-

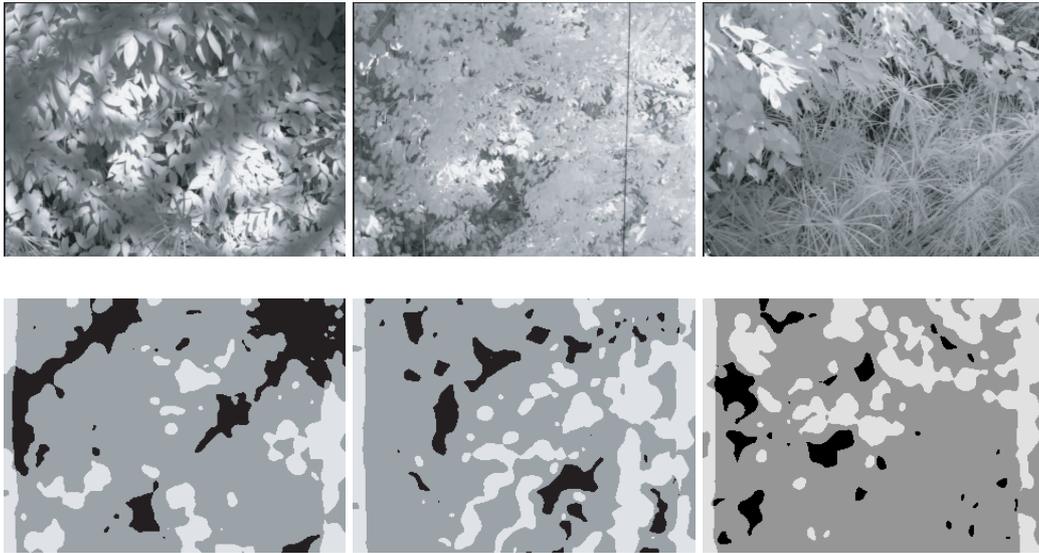


Abbildung 8.25: Auswahl von Teilbildern: (*oben*) Eine Auswahl von Originalaufnahmen. Unterschiedliche Pflanzen und Entfernungen können rekonstruiert werden. (*unten*) Die entsprechenden Rangbilder: Pixelpositionen an denen erfolgreich Tiefenwerte rekonstruiert werden konnten erscheinen grau. Die Rekonstruktion ist in weiten Bildteilen erfolgreich.

ben dem Innengerüst befinden sich z.B. Sprenkieranlagen und Seile im Biom (Abbildung 8.26). Diese nichtpflanzlichen Objekte sollen nach Möglichkeit nicht Teil der Rekonstruktion sein. Deshalb wurden die Teilbilder, welche hauptsächlich das Innengerüst des Bioms zeigen, nicht in die Rekonstruktion aufgenommen.

Eine weitere Schwierigkeit sind die in manchen Aufnahmen großen Tiefenunterschiede: Die Bilder enthalten Regionen mit stark unterschiedlicher Entfernung zur Kamera. Die Tiefenbilder werden aus den lokalen Disparitäten berechnet. Die Disparitäten werden als lokale Verschiebung der Bildstrukturen bestimmt, dafür müssen die Bilder global um einen konstanten Betrag vorverschoben werden. Dieser Vorverschiebungsparameter legt das Auswertesystem also auf einen bestimmten Tiefenbereich fest, nur für diesen Bereich lässt sich die Disparität lokal bestimmen.

8.3.3 Rohdaten und Auflösungsreduzierung

In den 122 berechneten Einzelrekonstruktionen wurden insgesamt etwa 3,5 Millionen Oberflächenpositionen bestimmt (Abbildung 8.27 oben). Die Lage der Punkte ist wie erwartet grob schüsselförmig. Im linken Teil des Bioms erscheint die Oberfläche dicht und geschlossen. Die Streuung der Tiefenwerte nimmt mit wachsender Entfernung zur Kamera zu: Die kleine Stereobasis führt zu größeren Fehlern. Fast alle so bestimmten Oberflächenpunkte liegen aber innerhalb des Bioms. Die großen Löcher im Zentralbereich der Rekonstruktion sind eine Folge des Messprinzips: Zwischen diesen Bereichen und der Kamera liegt die im Zentralbereich von Abbildung 8.23 sichtbare Erhöhung; auf dieser sind die Ventilatoren installiert.

Die rekonstruierte Gesamtoberfläche soll für die botanische Anwendung als Gitter parametrisiert werden. Dafür ist eine Reihe von Gitterpunkten notwendig, deren Anzahl sollte nicht zu hoch sein,

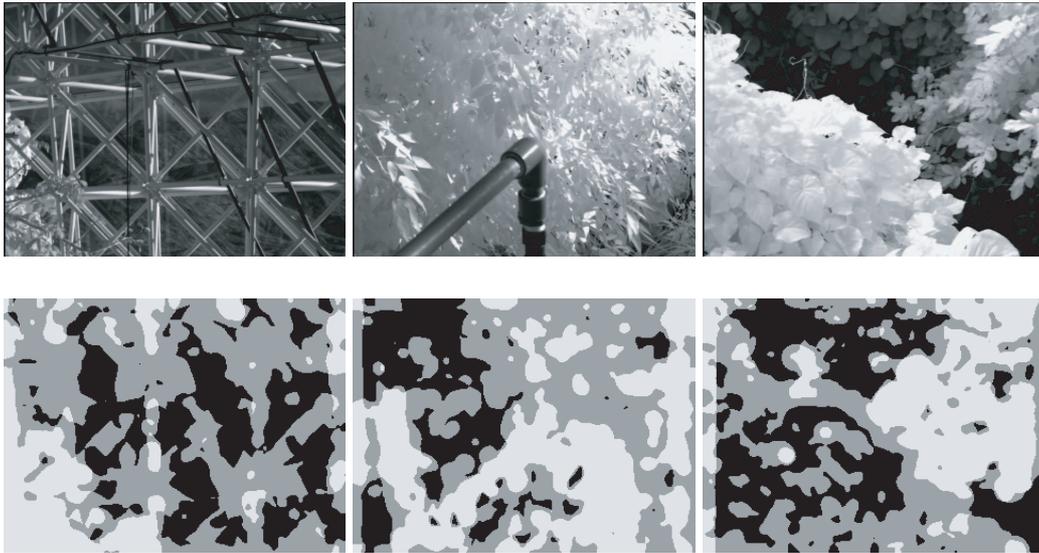


Abbildung 8.26: Problemquellen in Kronendachrekonstruktion: (**links**) Teilbild mit Gerüst. Originalbild (oben) und Bild des Ranges (unten), erfolgreich rekonstruierte Bereiche erscheinen grau. (**mitte**) Sprenkleranlage im Bild. Originalbild (oben) und Bild des Ranges (unten). (**rechts**) Große Tiefenunterschiede im Bild. Nur die nahen Strukturen im linken Bildteil können rekonstruiert werden. Originalbild (oben) und Bild des Ranges (unten).

um den numerischen Aufwand in Grenzen zu halten. Als einfache Methode zur Reduzierung der Datenmenge wurde eine Beschränkung auf gemittelte Positionen gewählt: Jede Teiloberfläche wurde in vier Quadranten unterteilt, in jedem der Quadranten wurde der Mittelwert der Positionen berechnet. Für jede Teiloberfläche ergeben sich also vier gemittelte Positionen, bei 122 Teilrekonstruktionen wird die Gesamtoberfläche durch 488 Gitterpunkte repräsentiert (Abbildung 8.27 unten). Dies ist gegenüber der manuellen Bestimmung von 50 Oberflächenpunkten eine Auflösungssteigerung um einen Faktor 10.

Zur Verbesserung der Anschaulichkeit empfiehlt es sich, benachbarte Gitterpunkte zu verbinden (Abbildung 8.28). Je näher die Teilbilder, desto näher beeinander liegen die Gitterpunkte. In der Südostecke des Bioms kann man erkennen, dass die Oberfläche sich vom Innengitter weg nach innen wölbt: Diese Struktur repräsentiert das Kronendach eines großen Baumes (vergleiche Abbildung 8.23). Rechts davon weicht die Oberfläche bis an das Gerüst zurück, an dieser Stelle reicht das Gerüst bis fast zum Boden.

8.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zwei exemplarische Anwendungen der entwickelten Methoden vorgestellt: Die Untersuchung von Wuchsdynamiken auf wachsenden Pflanzenorganen und die Rekonstruktion eines Kronendaches. Wuchsratenmessungen wurden an Kaktuskladodien, -früchten und Feigen durchgeführt. Teilweise konnten die Wuchsratenverläufe lokale Dynamiken auflösen, in allen drei Fällen zeigte der zeitliche Verlauf der Wuchsraten einen Tagesgang. Zum ersten Mal wurden Wuchsraten an

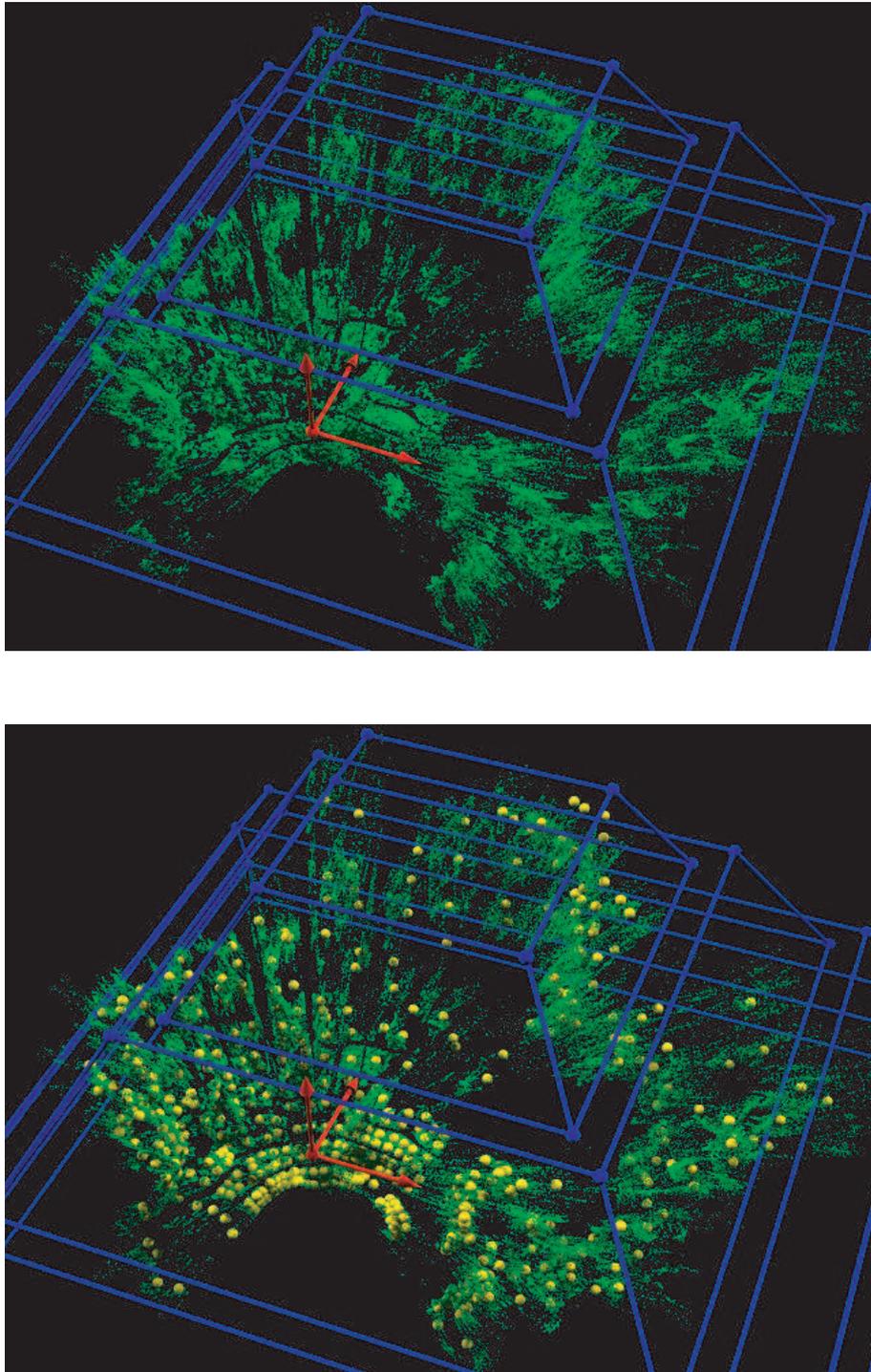


Abbildung 8.27: Visualisierung der Oberflächendaten: (**oben**) Darstellung der Rohdaten (grün). Von insgesamt etwa 3,5 Millionen Oberflächenpunkten sind 350.000 dargestellt. (**unten**) Datenreduzierung: Jeder der Teilbildbereiche (vergleiche Abbildung 8.25) wird in vier Quadranten unterteilt und innerhalb dieser eine gemittelte Position berechnet. Die resultierende Oberfläche ist aus 488 Punkte (gelb) zusammengesetzt.

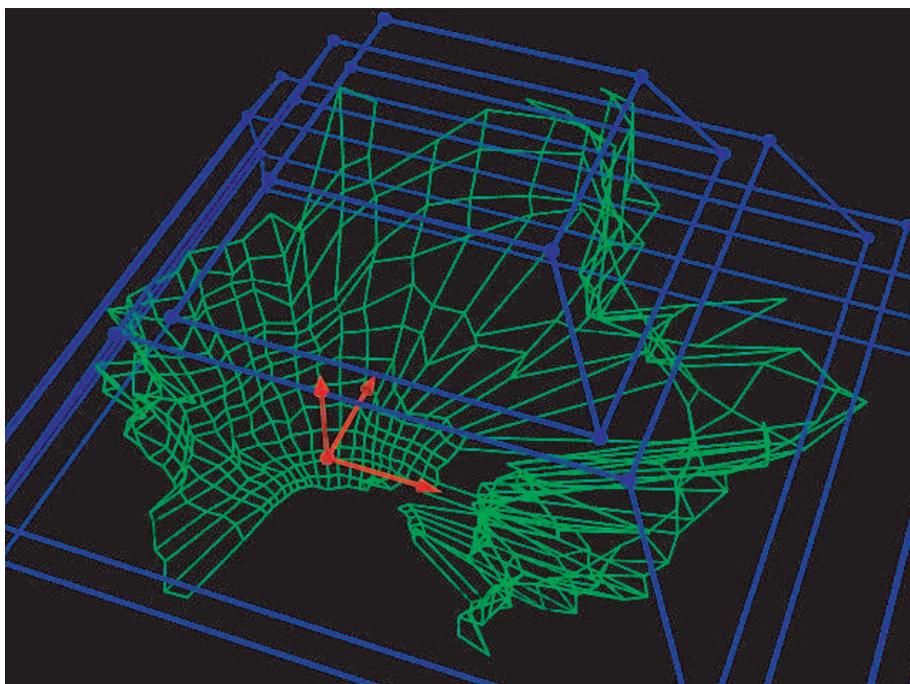
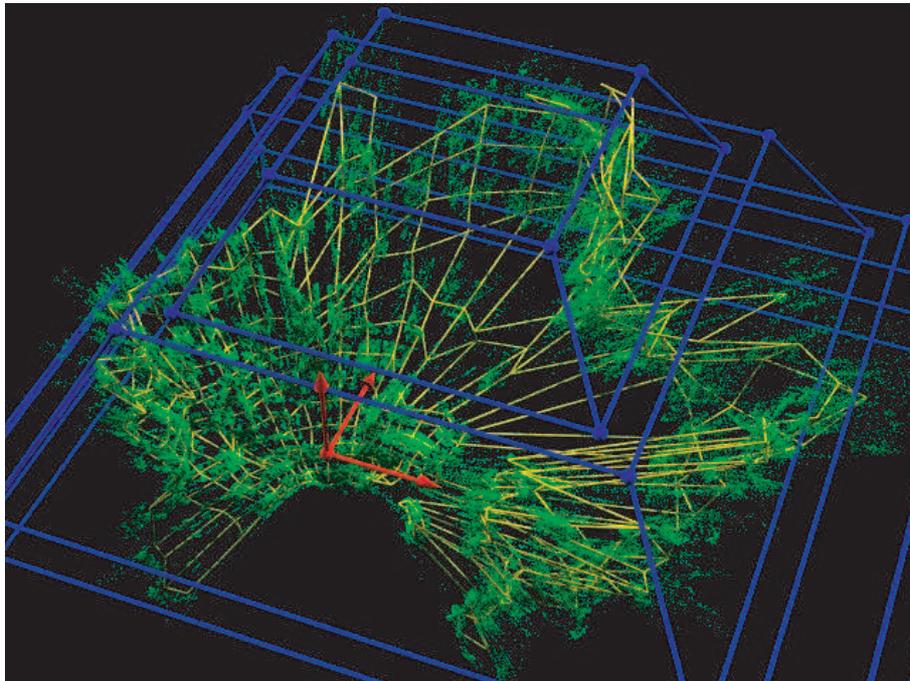


Abbildung 8.28: Visualisierung der Oberflächendaten: (**oben**) Rohdaten (grün) und Gitterdarstellung der Oberfläche (gelb). Benachbarte gemittelte Positionen werden durch Linien verbunden. (**unten**) 3D-Visualisierung der berechneten Oberfläche als Gitter.

gewölbten Pflanzenorganen bestimmt.

Das entwickelte Verfahren zur Rekonstruktion ausgedehnter Oberflächen wurde im Regenwaldbiom des Biosphere 2 Center angewandt. Dabei wurde fast der gesamte Kronendachbereich rekonstruiert. Dies geschah in einer Auflösung, die mit bekannten Methoden nicht zu erreichen ist.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Verfahren zur Untersuchung von sich verformenden Oberflächen entwickelt. Durch die Erweiterungen des Strukturtensoverfahrens wird die simultane Bestimmung von Tiefeninformation und optischem Fluss möglich. Eine Umsetzung dieser Verfahren ermöglicht die Berechnung der Wachsraten von wachsenden Pflanzen. Dabei konnten erstmals Tagesgänge von gewölbten Pflanzenoberflächen gemessen werden. Eine zweite Anwendung erlaubt die 3D-Rekonstruktion von nichtkontinuierlichen, ausgedehnten Oberflächen durch Zusammensetzung rotierter Teilrekonstruktionen. Als Beispielperiment wurde das Kronendach des Regenwaldes im Biosphere 2 Center vermessen. 3D-Rekonstruktionen von Kronendächern in so hoher Genauigkeit waren bisher nicht möglich.

Zusammenfassung der Arbeit

Das entwickelte 3D-Verfahren baut auf einem bestehenden 2D-Verfahren auf: Der optische Fluss, d.h. die Bewegung der Szene in einer 2D-Bildsequenz, wird mit einem differentiellen Total-Least-Squares-Verfahren, dem Strukturtensoansatz, berechnet. Die Berechnung von Oberflächenwachsraten als Divergenz des optischen Flusses hat eine gravierende Einschränkung: Die Oberflächen der Objekte müssen fronto-parallel fixiert liegen, da Tiefenunterschiede zu Größenänderungen im Bild führen. Um zwischen echtem und scheinbarem Wachstum durch Tiefenänderungen zu unterscheiden, muss der Tiefenverlauf der Oberflächen bekannt sein.

Zur Gewinnung von Tiefeninformation wird ein Small-Baseline-Stereoansatz verwendet: Kleine Kameraverschiebungen entlang einer Achse führen zu korrespondierenden Verschiebungen der Objekte in der Szene. Die Realisierung von nah benachbarten Kamerapositionen erfolgt über die Verschiebung einer einzelnen Kamera mit einem rechnergesteuerten Verschiebetisch. Interpretiert man die Kamerapositionen als zusätzliche Dimension, so kann der zeitliche Verlauf der Multikamera-sequenzen als vierdimensionaler Datensatz aufgefasst werden. Zur Berechnung der Tiefe kann ein lineares Modell aufgestellt werden: Die Kontinuitätsgleichung des optischen Flusses wird um Disparitätsterme erweitert. Eine Parameterschätzung mit Hilfe des Strukturtensoverfahrens liefert simultan Tiefen- und Flussinformation. Eine zusätzliche Erweiterung erlaubt die gleichzeitige Schätzung der Divergenz des Flussfeldes. Sowohl Tiefenbewegung als auch echtes Wachstum rufen Divergenzen hervor. 3D-Bewegungen starrer Körper können deshalb leicht bestimmt werden. Für deformierbare bzw.

wachsende Objekte müssen die beiden Effekte getrennt werden. Diese Trennung kann in einem Schritt nur über ein nichtlineares Modell geschehen, deshalb kann mit der zusätzlichen Divergenzschätzung in einem linearen Ansatz kein Wachstum bestimmt werden.

Das entwickelte Verfahren zur simultanen Bestimmung von Tiefe und optischem Fluss erlaubt die Berechnung von Wuchsraten auf sich bewegenden, gewölbten Oberflächen: In einem ersten Schritt wird die Tiefengeschwindigkeit durch Projektion auf zeitlich aufeinanderfolgende Oberflächen bestimmt. Die tiefenbedingten Verzerrungen werden durch zentrische Streckungen bzw. Stauchungen korrigiert. Wuchsraten können anschließend durch relative Größenänderungen von Teilflächen berechnet werden.

Die Auswertung statischer Multikamerasequenzen erlaubt die 3D-Vermessung von nichtkontinuierlichen Oberflächen ohne Bestimmung des zeitlichen Flussfeldes. Unter den getesteten pflanzlichen Objekten war auch ein Ficus-Busch, sein dichtes Blattwerk kann als geglättete Einhüllende rekonstruiert werden. Um dies auch bei ausgedehnten Pflanzenbeständen zu ermöglichen, wurde ein Verfahren entwickelt, das die Zusammensetzung von biangular rotierten 3D-Teilrekonstruktionen zu einer Gesamtoberfläche ermöglicht.

Die experimentelle Umsetzung der entwickelten Verfahren geschah im Rahmen eines einjährigen Aufenthaltes am Biosphere 2 Center in Oracle, Arizona. Exemplarische Wuchsratenmessungen wurden an Kakteen und Feigen durchgeführt, an beiden wurden deutliche Tagesgänge im Wuchsratenverlauf festgestellt. Sowohl Feigen als auch Kakteen haben nichtplanare Oberflächen, das entwickelte Verfahren ermöglicht erstmals die Berechnung von Wuchsraten auf gewölbten, nichtfixierten Pflanzenorganen.

Der 3D-Verlauf eines Regenwald-Kronendaches wurde in einem Teil des Biosphere 2 Centers bestimmt. Mit einem um zwei Achsen rotierbaren Kameraarm wurden Mehrkamerasequenzen von 122 Einzelpositionen aufgenommen. Der Überlapp polar benachbarter Teilrekonstruktionen wurde korrigiert und die Oberflächendaten in kartesische Koordinaten relativ zur Kameraposition transformiert. Die ursprünglich 3,5 Millionen Oberflächenpunkte wurden durch Mittelungen auf 488 Positionen reduziert, da für die botanische Anwendung, eine Lichtmodellierung des Kronendaches, Darstellungen in dieser Auflösung vorteilhaft sind. Erstmals sind Kronendachrekonstruktionen mit solch hoher Genauigkeit möglich.

Ausblick

Der nächste Schritt ist der Einsatz der zwei entwickelten Messsysteme in systematischen botanischen Messungen. Sowohl für Wuchsratenmessungen auf Pflanzenorganen als auch für Rekonstruktionen von Kronendächern stehen Programmpakete für Bildaufnahme, Datenauswertung, Weiterverarbeitung und Visualisierung zur Verfügung. Trotzdem sind für beide Anwendungen Erweiterungen möglich, sowohl im theoretischen als auch im experimentellen Teil des Systems.

- Die verwendeten Kameras sind einfache schwarz-weiß CCD-Kameras. Fokussierung und Blendeneinstellung erfolgen manuell. Vor allem für die Rekonstruktion von Kronendächern könnte der Einsatz anderer Kameras und Objektive Verbesserungen bringen: Ein Autofokus und eine

automatische Blendeneinstellung erlauben Aufnahmen ohne manuellen Eingriff. Die Bildaufnahme kann so völlig automatisiert werden. Die Trennung von Blattwerk und nichtpflanzlichen Strukturen stellt bei der 3D-Rekonstruktion von Kronendächern ein Problem dar. Bei Verwendung von Farbkameras können die Aufnahmen durch Farbsegmentierung auf pflanzliche Strukturen beschränkt werden.

- Bei allen Aufnahmen wurden die verschobenen Kamerapositionen über Verschiebungen einer Kamera mit einem Lineartisch realisiert. Bei Kronendachrekonstruktionen treten große Tiefenunterschiede auf. Die Genauigkeit der Rekonstruktion ist von der Stereobasis abhängig, wird diese zu klein, so steigt das Rauschen in der Rekonstruktion stark an. Eine automatische Stereobasisoptimierung ist denkbar, aus einer vorläufigen Tiefenschätzung kann die optimale Größe der Stereobasis bestimmt werden.
- Die Tiefeninformation wird aus der Disparität zwischen Bildern benachbarter Kamerapositionen berechnet. Da das Strukturtenorverfahren nur Verschiebungen bis etwa drei Pixel bestimmen kann, werden die Bilder um einen festen Betrag vorverschoben. Die verbleibenden kleinen bzw. Subpixeldisparitäten werden geschätzt. Die Vorverschiebung legt also einen Tiefenbereich fest, in dem rekonstruiert werden kann. Durch das automatisierte Durchlaufen mehrerer Vorverschiebungen kann damit in weiten Tiefenbereichen rekonstruiert werden.
- Die Anordnung der Multikamerapositionen ist eindimensional: Die verschiedenen Positionen liegen alle auf einer Achse. Die Erweiterung dieser Geometrie auf flächige Kamerapositionen ist denkbar. Damit kann eine Steigerung der Genauigkeit erreicht werden.
- Die 3D-Rekonstruktion von ausgedehnten Oberflächen wie Kronendächern ist statisch, die Rechnungen erfolgen zu einem Zeitpunkt. Das Verfahren kann trotzdem verwendet werden, um Wachstumsprozesse zu erfassen: Wird die Rekonstruktion zu einer späteren Zeit wiederholt, so spiegelt sich der Zuwachs in der 3D-Ansicht wider.
- Die vorgestellten Verfahren lassen sich mit weiteren Remote-Sensing Techniken koppeln. Die simultane Messung von Wachstum und photosynthetischer Aktivität ist geplant.

Anhang A

Notation

Partielle Ableitungen $\frac{\partial a}{\partial x} = \partial_x a = a_x$

Vektoren \mathbf{a}, \mathbf{b}

Matrizen und Bilder \mathbf{A}, \mathbf{B}

Weltkoordinaten X, Y, Z

Sensor- oder Bildkoordinaten x, y

Oberflächenbewegung $\mathbf{f} = [U, V, W]^T$

Optischer Fluss $\mathbf{f} = [u_x, u_y]^T$

Disparität v

Sensor- oder Bildauflösung N_x, N_y

Öffnungswinkel der Kamera β_x, β_y

Anhang B

Aufnahme der Würfelsequenzen

Um die Genauigkeit der entwickelten Verfahren zu testen, sollen die Ergebnisse auf synthetischen und echten Sequenzen verglichen werden. Diese sollen verschiedene Bewegungsformen umfassen, im vorliegenden Fall sind Translationen und Rotationen umgesetzt worden. Als Objekt dient ein Würfel mit aufgeklebtem Rauschmuster. Das vorliegende Bildmaterial umfasst zwei Teilsequenzen: Zum einen die sogenannte Basissequenz. Dabei dreht sich der Würfel zuerst langsam um 90 Grad, bewegt sich dann nach rechts in einen Bereich hinein, bei dem er teilweise beschattet wird, und dreht sich schließlich in diesem beschatteten Bereich wieder um 90 Grad zurück. In der y-Sequenz bewegt sich der Würfel auf die Kamera zu. Diese Bewegungsfolgen sind für 19 Kamerapositionen aufgenommen worden.

B.1 Messaufbau

Der Messaufbau besteht aus einem Grundrahmen aus X95-Trägern. An dessen einem Ende befindet sich das Objekt, beweglich über ein System aus zwei Verschiebetischen und einem Drehtisch. Am anderen Ende befindet sich die Kamera, diese ist über zwei Verschiebetische ebenfalls beweglich (Abbildung B.1). Der ursprüngliche Abstand von Objekt und Kamera liegt bei etwa 70 cm. Alle relevanten Entfernungen sind in Abbildung B.3 aufgetragen.

Kamera, Dreh- und Verschiebetische

Bei der Progressive-Scan-CCD-Kamera handelt es sich um das Modell SONY XC-55. Die Kamera hat eine räumliche Auflösung von 480×640 Pixel, bei einer Helligkeitsauflösung von 256 Graustufen. Um zu verhindern, dass die tageszeitlich bedingten Helligkeitsschwankungen Einfluss auf die Messungen haben, wurde das 12mm-Objektiv (Cosmicar/Pentax) mit Infrarotfiltern versehen.

Bei den x- und y- Verschiebetischen des Objekts und dem x-Verschiebetisch der Kamera handelt es sich um das Modell VTM-80, bei dem z-Verschiebetisch der Kamera um das Modell LM-60 (beide Fa. Owis, Stauffen). Die Positioniergenauigkeit der Tische liegt bei 5 bzw. $1 \mu\text{m}$. Der Drehtisch ist ein Exemplar des Modells DMT-100, seine Positioniergenauigkeit liegt bei 0,01 Grad. Die Ansteuerung

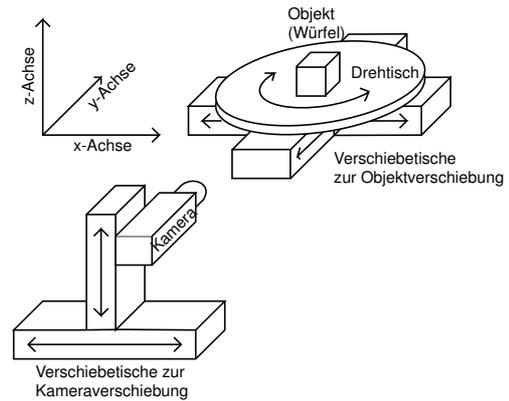


Abbildung B.1: Ground Truth Sequenzen: (*links*) Das Aufnahmesystem. Die Diodenarrays links der Kamera dienen zur Beleuchtung. (*rechts*) Skizze des Aufnahmesystems. Die Kamera ist auf ein System von zwei Verschiebetischen montiert, der Würfel auf ein System von zwei Verschiebetischen und einem Drehtisch.

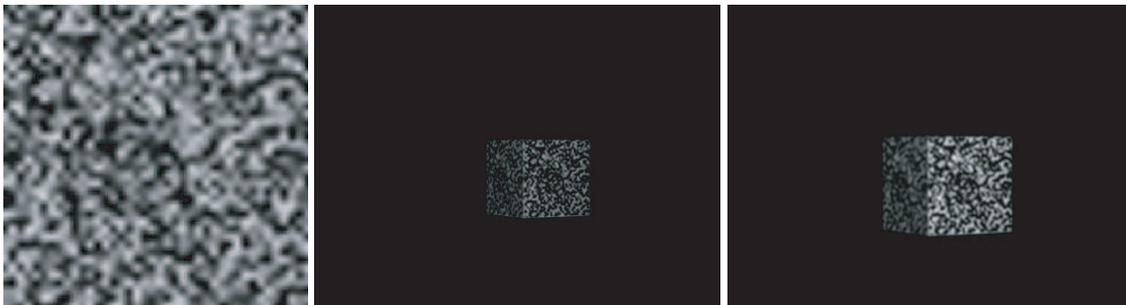


Abbildung B.2: Der Würfel: (*links*) Das auf den Würfel geklebte Rauschmuster. (*mitte*) Würfel zu Beginn der Tiefensequenz. (*rechts*) Würfel am Ende der Tiefensequenz.

der Tische erfolgt über die Steuerkarte SM-32, damit wird eine automatisierte Ansteuerung von bis zu drei Tischen über einen Rechner möglich.

Der Würfel

Als Aufnahmeobjekt dient ein Aluminiumwürfel mit einer Kantenlänge von 4,9 cm (Abbildung B.2). Auf seine Seiten wurde ein Rauschmuster geklebt. Auf 25×25 Pixel wurde ein Schwarz-Weiß-Rauschmuster erzeugt und kubisch interpoliert auf 200×200 Pixel vergrößert. Durch diese Vergrößerung um einen Faktor 8 beträgt die Größe (Wellenlänge) des Musters auf dem Bild 4 Pixel. Dieses 200×200 Pixel Rauschmuster wird auf einer Fläche von $4,9 \times 4,9$ cm ausgedruckt. Vorüberlegung: In den später aufgenommenen Sequenzen erscheint der Würfel etwa 100×100 Pixel groß, d.h. die "Wellenlänge" des Rauschmusters liegt bei etwa 2 Pixel, wenn eine Würfelseite direkt zur Kamera zeigt.

B.2 Die Sequenzen

Die aufgenommenen Sequenzen sollen mit dem Strukturtensoverfahren ausgewertet werden. Damit dieses Verfahren stabil funktioniert, sollte die Verschiebung der betrachteten Objekte zwischen Bildern einer Sequenz klein sein, im Idealfall in der Größenordnung 0,5 Pixel. Deshalb wurden die Objektverschiebungen zwischen den Einzelbildern klein gewählt: Bei den Translationen in x-Richtung wurde eine Verschiebung von 0,1 Pixel angestrebt, für die Rotationssequenzen eine Kantenverschiebung im Subpixelbereich zwischen den Einzelbildern. Auch für die y-Sequenzen, dabei bewegt sich der Würfel auf die Kamera zu, sollte die Größenänderung des Würfels im Subpixelbereich liegen.

Die Tiefensequenz

Als Teil der Objektfahrten wird eine Bewegung in negativer y-Richtung aufgenommen, d.h. auf die Kamera zu. Ausgehend von seiner Ausgangsposition, bei der er mit seiner Stirnseite zur Kamera zeigt, wurde der Würfel vor Beginn der y-Sequenz um 30 Grad im Gegenuhrzeigersinn gedreht. Das Objekt (d.h. etwa die Seitenlänge des Würfels) vergrößert sich von etwa 120 auf etwa 150 Pixel, falls es um 15 cm verschoben wird. Um auch hier Verschiebungen im Bereich 0,1 Pixel zu erreichen wurde der Würfel 150 mal um jeweils 1 mm verschoben. Als Beleuchtung wurden zwei Arrays von Infrarotdioden gewählt. Diese sind links der Kamera positioniert, d.h. der Würfel wird von eher links beleuchtet (Abbildung B.1). Da sich der Würfel außerdem innerhalb der y-Sequenz der Lichtquelle nähert, erscheint er gegen Ende der Sequenz heller als zu Beginn.

Die Basissequenz

Im Gegensatz zu der y-Sequenz, bei der nur ein Verschiebetisch zur Bewegung des Würfels benutzt wurde, werden in der sogenannten Basissequenz zwei Tische benutzt: Ein Verschiebetisch zur Bewegung in x-Richtung und der Drehtisch zur Rotation um die z-Achse. Daneben soll in diesen Sequenzen auch die Einwirkung von Schatten beobachtet werden. Deshalb befindet sich (zusätzlich zu der Beleuchtung aus der y-Sequenz) rechts vor dem Würfel ein Keil, der einen Schatten in dem Bereich wirft, in den sich Würfel hineinbewegt.

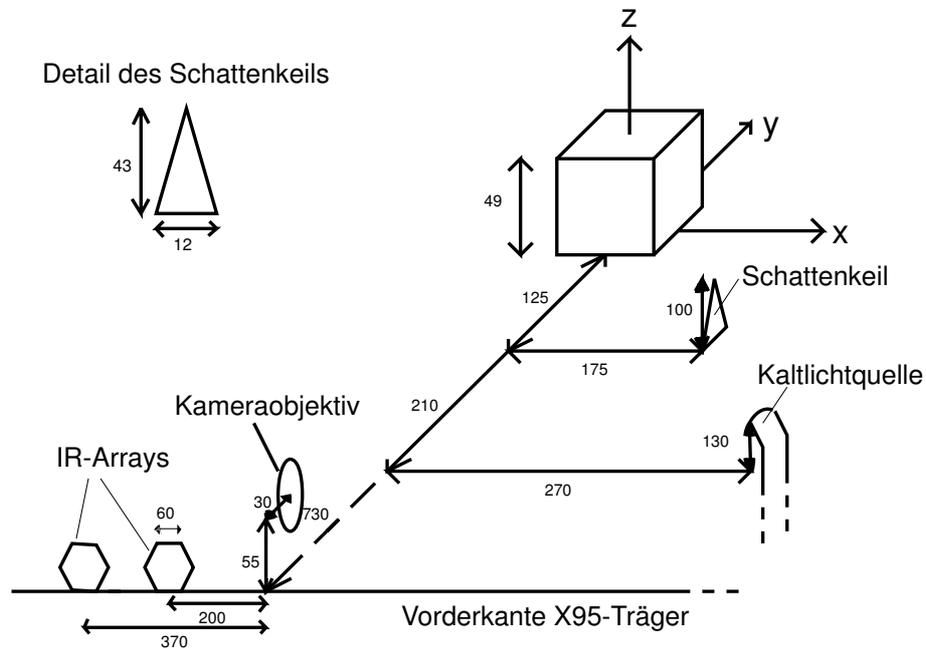
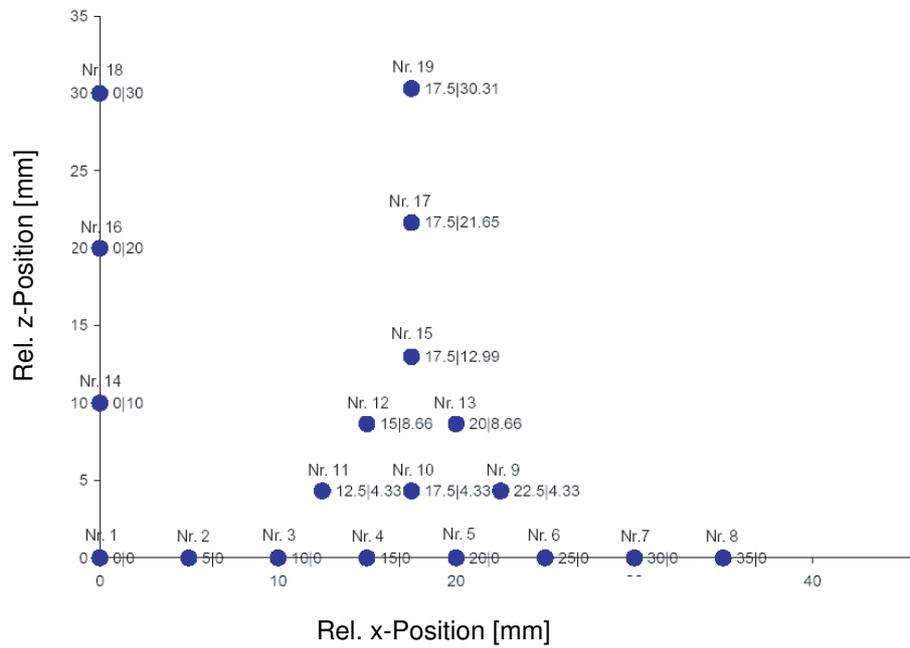


Abbildung B.3: Wichtige Daten des Aufbaus: (*oben*) Skizze der Kamerapositionen. Insgesamt wurden 20 Kamerapositionen angefahren. (*unten*) Der Aufbau mit relevanten Abmessungen.

Anhang C

Das Sprühmarkerverfahren

Ein Grundproblem bei vielen botanischen Aufnahmen ist die geringe Struktur der beobachteten Objekte, wie Pflanzenblättern: Natürliche Strukturen, z.B. Blattadern, decken nur einen kleinen Teil der Blattfläche ab. Das Strukturtenorverfahren liefert aber nur bei ausreichender Struktur Ergebnisse. Da die Oberfläche farblich nur wenig strukturiert ist, entsteht Struktur im Kamerabild vor allem durch geschickte Beleuchtung des Oberflächenreliefs. Künstlich auf die Blattoberfläche aufgebrachte Marker lösen dieses Problem weitgehend. Im vorliegenden Fall wird die Verwendung von aufgesprühten Farbtröpfchen untersucht.

Im vorliegenden Fall wurde schwarze Wasserfarbe mittels einer Zahnbürste (Dr. Best, Bühl) aus einem Abstand von etwas 2 cm auf die Objektflächen gesprüht. Die Tröpfchengröße lässt sich durch Variierung der Borstenauslenkung steuern, im Bild liegt sie dann im Idealfall bei einigen Pixel. Bei ausreichender Dichte liefern die Tröpfchen eine ausgezeichnete Struktur. Durch den starken Helligkeitskontrast zur dahinter liegenden grünen Blattoberfläche bleiben die Punkte auch bei Neigungs- bzw. Helligkeitsänderungen sichtbar. Die Beleuchtungssituation vereinfacht sich: Der gesamte Aufbau kann einheitlich hell ausgeleuchtet werden, da nicht auf günstige Beleuchtung des oberflächeneigenen Reliefs geachtet werden muss. Außerdem treten kaum noch Glanzlichter auf. Lageänderungen des Objekts haben geringere Auswirkungen, diese können durch Hochpassfilterung



Abbildung C.1: Ein Bild der verwendeten Bürste in fabrikneuem Zustand.

weiter vermindert werden. Durch eine einheitlich deutliche Struktur wird außerdem die Bestimmung der Auswertungsparameter erleichtert.

Eine Anwendung des Sprühmarkerverfahrens stellt natürlich eine Veränderung der natürlichen Situation der Pflanze dar: Ein Teil der Blattoberfläche ist mit Farbe bedeckt, deren Anteil liegt allerdings im Prozentbereich und lässt sich voraussichtlich noch vermindern ohne die Qualität der Ergebnisse zu beeinträchtigen. Wahrscheinlich wird lokal die Photosyntheseaktivität reduziert, weitere Auswirkungen der Farbe auf die Pflanze sind unwahrscheinlich und lassen sich durch die Verwendung chemisch inerte Substanzen wie Holzkohletusche oder Aktivkohle vermeiden.

Weiterhin denkbar ist die Verwendung von farbigen oder fluoreszierenden Markerpunkten, bei entsprechender Beleuchtung wären die Marker dann sicht- bzw. unsichtbar. Der letzte Punkt führt direkt zu einem eventuell weiteren Nachteil der Methode: Das Auffinden der natürlichen Blattstrukturen in den Bildern wird durch die kontrastreichen Marker erschwert.

Anhang D

Kalibrierung an Gebäudemerkmalen

Dem entwickelten Near-Baseline Stereoverfahren liegt das Lochkameramodell zugrunde: Die Tiefeninformation ist als Disparität kodiert. Als Parameter geht in die Umrechnung, neben dem Abstand der Kamerapositionen, die Brennweite der Kamera ein. Die Positionen der Kamera können, bedingt durch die Genauigkeit der Verschiebetische, als fehlerfrei angenommen werden. Die Brennweite von Objektiven hängt davon ab, auf welche Tiefe sie scharf gestellt sind. Um Disparitäten korrekt in Tiefe umkalibrieren zu können, muss die exakte Brennweite der Kamera bestimmt werden. Für die Kalibrierung von Kameras existiert eine Vielzahl von Verfahren (z.B. [98][99]); die meisten Verfahren arbeiten mit Kalibriertargets, anhand der Lage der Targets in den Bildern wird kalibriert.

In xy-Richtung werden die Tiefen- und Flussdaten in Pixelkoordinaten ausgegeben, hier ist eine Umeichung in Weltkoordinaten notwendig. Für eine bestimmte Kalibriertiefe muss also bestimmt werden, welcher Länge in Weltkoordinaten eine Länge in Pixel entspricht. Für den Fall der Rekonstruktion des Regenwaldkronendaches ist eine Kalibrierung an Targets nicht notwendig: Mit Hilfe der Konstruktionspläne des Biosphere 2 Centers kann die echte Länge und Entfernung von Strukturen des Außengitters bestimmt werden, die in den Bildern sichtbar sind.

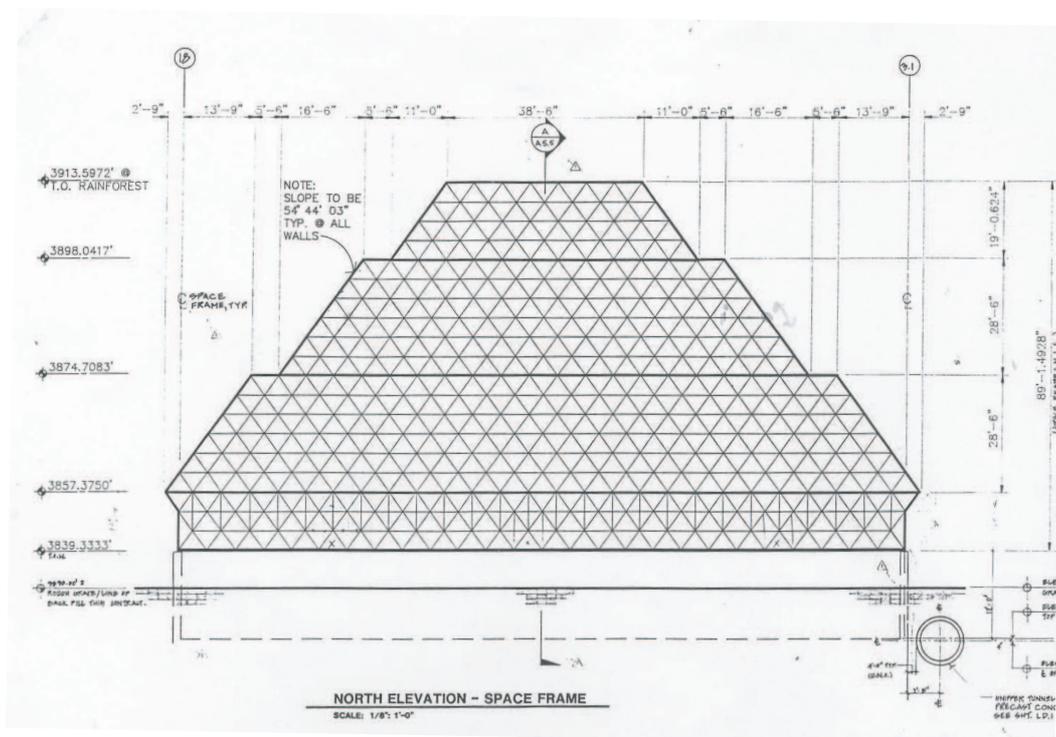


Abbildung D.1: Aufriss des Regenwald-Bioms. Hieran erfolgte die Kalibrierung der Kronendachrekonstruktion.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Adrian. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, pages 261–304, 1991.
- [2] E. Ahokas, H. Kaartinen, and Juha Hyypä. A quality assessment of airborne laser scanner data. In *3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data*, Dresden, Germany, 2003.
- [3] W. C. Allee. Measurement of environmental factors in the tropical rain-forest of panama. *Ecology*, 7:273–302, 1926.
- [4] P. Anandan. A computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion. *International Journal of Computer Vision*, 2:283–319, 1989.
- [5] J.L. Barron, D.J. Fleet, and S.S. Beauchemin. Performance of optical flow techniques. In *IJCV*, pages 43–77, 1994. 12(1).
- [6] G. T. S. Beemster and T. I. Baskin. Analysis of cell division and elongation underlying the developmental acceleration of root growth in arabidopsis thaliana. *Plant Physiology*, 116:1515–1526, 1998.
- [7] M. Black, D. Fleet, and Y. Yacoob. Robustly estimating changes in image appearance. *CVIU*, 7(1):8–31, 2000.
- [8] M. Black and A. Jepson. Estimating optical flow in segmented images using variable-order parametric models with local deformations. *PAMI*, 18(10):972–986, 1996.
- [9] F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny, and Michel Roux. Estimating intrinsic accuracy of airborne laser data with local 3d-offsets. In *3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data*, Dresden, Germany, 2003.
- [10] R. T. Brumfield. Cell growth and division in living root meristems. *American Journal of Botany*, 29:533–543, 1942.
- [11] G. S. Campbell and J. M. Norman. In G. Russell, B. Marshall, and P. Jarvis, editors, *Plant Canopies: Their Growth, Form, and Function*, page 1–19. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1989.
- [12] R. Carceroni and K. Kutulakos. Multi-view 3d shape and motion recovery on the spatio-temporal curve manifold. In *ICCV (1)*, pages 520–527, 1999.

- [13] S. Chen. Quicktime vr—an image-based approach to virtual environment navigation. *ACMSIG-GRAPH, Los Angeles, USA*, 8:29–38, 1995.
- [14] T. S. J. Denney and J.L. Price. Optimal brightness functions for optical flow estimation of deformable motion. In *IEEE Trans. Im. Pr.*, pages 178–191, 1994.
- [15] I. C. Dodd and W. J. Davies. The relationship between leaf growth and aba accumulation in the grass leaf elongation zone. *Plant Cell Environ.*, 19:1047–1056, 1996.
- [16] M. Baake E. Buff and A. Sievers. An empirical function for the description of root growth. *Plant Physiol.*, 83:685–690, 1987.
- [17] R. O. Erickson and K.W. Sax. Experimental growth rate of primary root of zea mays. In *Proceedings of the American Philosophical Society*, volume 100, page 487–489, 1956.
- [18] H. Farid and E. P. Simoncelli. Optimally rotation-equivariant directional derivative kernels. In *7th Int. Conf. Computer Analysis of Images and Patterns*, Kiel, 1997.
- [19] G. Farneböck. Fast and accurate motion estimation using orientation tensors and parametric motion models. In *ICPR*, pages 135–139, 2000.
- [20] O. Faugeras. *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*. MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [21] C. Fennema and W.Thompson. Velocity determination in scenes containing several movin objects. *Computer Graphics and Image Processing*, 9:301–315, 1979.
- [22] D. Fleet. *Measurement of Image Velocity*. Kluwer, 1992.
- [23] D.J. Fleet and K. Langley. Recursive filters for optical flow. *IEEE Trans. PAMI*, 17(1):61–67, January 1995.
- [24] C. Garbe. *Measuring Heat Exchange Processes at the Air-Water Interface from Thermographic Image Sequence Analysis*. PhD thesis, Heidelberg University, 2001.
- [25] F. Glazer, G. Reynolds, and P. Anandan. Scene matching through hierarchical correlation. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington*, pages 432–441, 1983.
- [26] L. Gouws. Diurnal changes in growth, metabolite levels and water relations of developing opuntia cladodes. Master’s thesis, Universität Heidelberg, 2004.
- [27] C. Granier and F. Tardieu. Spatial and temporal analysis of expansion and cell cycle in sunflower leaves. *Plant Physiol.*, 116:991–1001, 1998.
- [28] C. Granier and F. Tardieu. Methods to assess tropical rain forest canopy structure: an overview. *Plant Ecology*, 153:263–277, 2001.
- [29] W. Greiner. *Classical Theoretical Physics*. Springer, 2000.

- [30] S. Gupta and J. Prince. On variable brightness optical flow for tagged mri. In *Information Processing in Medical Imaging*, pages 323–334, 1995.
- [31] F. Halle. A raft atop the rain forest. *National Geographic*, 178:129–138, 1990.
- [32] H. Haußecker, U. Schimpf, C.S. Garbe, and B. Jähne. Physics from IR image sequences: Quantitative analysis of transport models and parameters of air-sea gas transfer. In *Gas Transfer at Water Surfaces*. American Geophysical Union, 2001.
- [33] H. Haußecker and D. Fleet. Computing optical flow with physical models of brightness variation. In *CVPR*, 2000.
- [34] H. Haußecker and H. Spies. Motion. In *Handbook of Computer Vision and Applications*. Academic Press, 1999.
- [35] H. Haußecker, H. Spies, and B. Jähne. Tensor-based image sequence processing techniques for the study of dynamical processes. In *Proc. Intern. Symp. On Real-Time Imaging and Dynamic Analysis*, volume 32(5), pages 704–711, 1998.
- [36] S. R. Herwitz, R. E. Slye, and S. M. Turton. Long-term survivorship and crown area dynamics of tropical rain forest canopy trees. *Bioscience*, 81:585–597, 2000.
- [37] B.K. Horn. *Robot Vision*. MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- [38] B.K. Horn and B.G. Schunk. Determining optical flow. In *Artificial Intelligence*, volume 17, pages 185–204, 1981.
- [39] B. Jähne. *Spatio-temporal image processing*, volume 751. Springer, Berlin, 1993.
- [40] B. Jähne. *Digital Image Processing*. Springer, 1997.
- [41] B. Jähne, H. Haußecker, H. Spies, D. Schmundt, and U. Schurr. Study of dynamical processes with tensor-based spatiotemporal image processing techniques. *ECCV 1998*, Springer, pages 322–336.
- [42] B. Jähne, H. Scharr, and S. Körkel. Principles of filter design. In *Handbook of Computer Vision and Applications*. Academic Press, 1999.
- [43] B. Jähne, H. Haußecker, H. Scharr, H. Spies, D. Schmundt, and U. Schurr. Study of dynamical processes with tensor-based spatiotemporal image processing techniques. In *ECCV 1998*, pages 322–336. Springer, 1998.
- [44] N. Kirchgeßner, H. Spies, H. Scharr, and U. Schurr. Root growth analysis in physiological coordinates. In *ICIAP'01*, Palermo, Italy, 2001.
- [45] G. J. Klein and R. H. Huesman. A 3d optical approach to addition of deformable pet volumes. In *IEEE Nonrigid and Articulated Motion Workshop*, page 136–143, 1997.

- [46] T. Koivunen and A. Nieminen. Motion field restoration using vectormedian filtering on high definition television sequences. In *Proc. Vis. Com. and Image Processing,'90*, volume 1360, pages 736–742, 1990.
- [47] J. Kvet and J. K. Marshall. In Z. Sestak, J. Catsky, and P. G. Jarvis, editors, *Plant Photosynthetic Production: Manual of Methods*, pages 517–555. Junk, The Hague, 1971.
- [48] A. R. G. Lang. Leaf orientation of a cotton plant. *Agricultural Meteorology*, 11:37–51, 1973.
- [49] M. Lefsky, W. Cohen, S. Acker, G. Parker, T. Spies, and D. Harding. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3):339–361, 1999.
- [50] L.H.Matthies, R.Szeliski, and T.Kanade. Kalman filter-based algorithms for estimating depth from image sequences. *Int. Journal of Computer Vision*, 3:209–236, 1989.
- [51] J.J. Little, H.H. Bulthoff, and T.A. Poggio. Analysis of differential and matching methods for optical flow. In *IEEE Workshop on Visual Motion, Irvine, CA*, pages 173–180, 1989.
- [52] M. D. Lowman. Plants in the forest canopy: some reflections on current research and future direction. *Plant Ecology*, 153:39–50, 2001.
- [53] R. Maksymowych. *Analysis of leaf development*. Cambridge University Press, Cambridge, 1973.
- [54] R. Maksymowych. *Analysis of Growth and Development of Xanthium*. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- [55] M. W. Moffett and M. D. Lowman. In M. D. Lowman and N. M. Nadkarni, editors, *Forest Canopies*, pages 73–106. Academic Press, San Diego, CA, 1995.
- [56] F. Morsdorf, E. Meier, B. Allgöwer, and D. Nüesch. Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. In *3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data*, Dresden, Germany, 2003.
- [57] I. Muul and L. B. Liat. Vertical zonation in a tropical forest in malaysia: method of study. *Science*, 196:788–789, 1970.
- [58] H.-H. Nagel. Displacement vectors derived from second-order intensity variations in image sequences. *Computer Graphics and Image Processing*, 21:85–117, 1983.
- [59] Y. Nakamura, T. Matsuura, K. Satoh, and Y. Ohta. Occlusion detectable stereo-occlusion patterns in camera matrix. In *CVPR*, pages 371–378, 1996.
- [60] M. Nilsson. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 56(1):1–7, 1996.
- [61] J. M. Norman and G. S. Campbell. In Percy R. W., Ehleringer J. R., Mooney H. A., and Rundel P. W., editors, *Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation*, page 301–325. Chapman and Hall, London, UK, 1989.

- [62] T. Pajdla. Epipolar geometry of some non-classical cameras. In *Proceedings of Computer Vision Winter Workshop*, page 223–233, 2001.
- [63] G. G. Parker. In M. D. Lowman and N. M. Nadkarni, editors, *Forest Canopies*, page 73–106. Academic Press, San Diego, CA, 1995.
- [64] G. G. Parker, A. P. Smith, and K. P. Hogan. Access to the upper forest canopy with a large tower crane. *Bioscience*, 42:664–670, 1992.
- [65] P. Peer and F. Solina. Capturing panoramic depth images with a single standard camera. *International Journal on Machine Graphics and Vision*, 10(3):369–397, 2001.
- [66] P. Peer and F. Solina. Panoramic depth imaging: Single standard camera approach. *International Journal of Computer Vision*, 47:149–160, 2002.
- [67] S. Peleg and M. Ben-Ezra. Stereo panorama with a single camera. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, USA*, page 395–401, 1999.
- [68] S. Peleg, M. Ben-Ezra, and Y. Pritch. Omnistere: Panoramic stereo imaging. *PAMI*, 23(3):279–290, March 2001.
- [69] J. Ross. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Junk, The Hague, 1981.
- [70] D. P. Boyd S. M. Song, R. M. Leahy and B. H. Brundage. Determining cardiac velocity fields and intraventricular pressure distribution from a sequence of ultrafast ct cardiac images. In *IEEE Transactions on Medical Imaging*, page 136–143, 1994.
- [71] H. Scharr. *Optimal Operators in Digital Image Processing*. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany, 2000.
- [72] D. Schmundt. *Development of an Optical Flow Based System for the Precise Measurement of Plant Growth*. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany, 1999.
- [73] D. Schmundt and U. Schurr. Plant leaf growth studied by image sequence analysis. In B. Jähne, H. Haußecker, and P. Geißler, editors, *Computer Vision and Applications Volume 2 Signal Processing and Pattern Recognition*. Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto, 1999.
- [74] D. Schmundt and U. Schurr. Epipolar geometry of central panoramic cameras. In R. Benosman and S. B. Kang, editors, *Panoramic Vision : Sensors, Theory, and Applications*. Springer Verlag, Berlin, Germany, 2000.
- [75] D. Schmundt, M. Stitt, B. Jähne, and U. Schurr. Quantitative analysis of the local rates of growth of dicot leaves at a high temporal and spatial resolution, using image sequence analysis. *The Plant Journal*, 16(4):505–514, 1998.
- [76] H. Schnyder, C. J. Nelson, and J. G. Coust. Assessment of spatial distribution of growth in the elongation zone of grass leaf blades. *Plant Physiol.*, 85:290–293, 1987.

- [77] H. Schnyder, C. J. Nelson, and W. G. Spollen. Diurnal growth of tall fescue leaf blades. *Plant Physiol.*, 86:1077–1083, 1988.
- [78] W. K. Silk. Steady form from changing cells. *Int. J. Plant Sci.*, 153:49–58, 1992.
- [79] H. Spies. *Die Analyse dynamischer Prozesse in Sequenzen von Tiefenkarten*. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany, 2001.
- [80] H. Spies, H. Haußecker, B. Jähne, and J.L. Barron. Differential range flow estimation. In *DAGM*, pages 309–316, 1999.
- [81] H. Spies, N. Kirchgeßner, H. Scharr, and B. Jähne. Dense structure estimation via regularised optical flow. In *VMV 2000*, pages 57–64, Saarbrücken, Germany, 2000.
- [82] H. Spies and H. Scharr. Accurate optical flow in noisy image sequences. In *ICCV'01*, pages 587–592, Vancouver, Canada, 2001.
- [83] R. Szeliski. Creating full view panoramic image mosaics and texture-mapped models. *Computer Graphics (ACM SIGGRAPH), Los Angeles, CA, USA*, 8:251–258, 1997.
- [84] R. Szeliski. A multi-view approach to motion and stereo. In *CVPR*, 1999.
- [85] G. Taylor, S. Ranasinghe, C. Bosac, S. D. L. Gardner, and R. Ferris. Elevated co₂ and plant growth: cellular mechanisms and responses of whole plants. *Journal of Experimental Botany*, 45:1761–1774, 1994.
- [86] S. Terjung. *Artübergreifende Bestimmung von Parametern des Primärwurzelwachstums durch raum-zeitlich hochaufgelöste Bildsequenzanalyse unter besonderer Berücksichtigung der Variation der externen Nährstoffverfügbarkeit*. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany, 2004.
- [87] O. Tretiak and I. Pastor. Velocity estimation from image sequences with second order differential operators. In *7th International Conference on Pattern Recognition*, pages 20–22, 1984.
- [88] C. van der Weele, Jiang H., K. Palaniappan, V. Ivanov, and T. Baskin. A new algorithm for computational image analysis of deformable motion at high spatial and temporal resolution applied to root growth. roughly uniform elongation in the meristem and also, after an abrupt acceleration, in the elongation zone. *Plant Physiol.*, 132(3):1138–48, Juli 2003.
- [89] S. Vedula, S. Baker, P. Rander, R. Collins, and T. Kanade. Threedimensional scene flow. In *ICCV 1999*, pages 722–729, 1999.
- [90] S. Vedula, S. Baker, S. Seitz, R. Collins, and T. Kanade. Shape and motion carving in 6d. In *CVPR 2000*, pages 592–598, 2000.
- [91] A. Walter. *Räumliche und zeitliche Wachstumsmuster in Wurzeln und Blättern dikotyler Pflanzen, Etablierung einer neuen Methode zur automatischen Durchführung von Wuchsanalysen auf Basis digitaler Bildsequenzverarbeitung*. PhD thesis, University of Heidelberg, Germany, 2001.

-
- [92] A. Walter and U. Schurr. Diurnal variation of leaf growth in *ricinus communis* and its relationship to tensile forces in the midrib - an analysis with digital image processing. *Conference of Plant Biomechanics*, 2000.
- [93] A. Walter and U. Schurr. Spatial variability of leaf development, growth and function. In B. Marshall and J. Roberts, editors, *Leaf Development and Canopy Growth*. Sheffield Academic Press, 2000.
- [94] J. Weickert. Applications of nonlinear diffusion in image processing and computer vision. In *Acta Math. Univ. Comeniana, Proc. of Algo. 2000*, volume LXX(1), pages 33–50, 2001.
- [95] J. Weickert and C. Schnörr. Variational optic flow computation with spatio-temporal smoothness constraint. In *Tech. Report 15/2000, Comp. Vis. and Patt. Rec. Group, Dept. of Math. and Comp. Sci, Univ. Mannheim*, 2000.
- [96] J. Weishampel, J. Blair, R.Knox, R. Dubayah, and D. Clark. Volumetric lidar return patterns from an old-growth tropical rainforest canopy. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2):409–415, 2000.
- [97] C.E. Willert and M. Gharrib. Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluid*, pages 181–193, 1991.
- [98] Z. Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In *IC-CV'99*, pages 666–673, Corfu, Greece, 1999.
- [99] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *PAMI*, 22(11):1330–1334, November 2000.

Danksagung

Von all denjenigen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, kann ich nur wenige nennen.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Bernd Jähne, für die Möglichkeit diese Promotion am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen durchführen zu können. Ich bedanke mich für seine Unterstützung und sein Vertrauen. Herrn Prof. Dr. Josef Bille danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Prof. Dr. Uli Schurr möchte ich ebenfalls für sein Vertrauen in mich danken, außerdem für die Möglichkeit ein Jahr am Biosphere 2 Center zu verbringen.

Ohne die Hilfe von Dr. Hanno Scharr, Dr. Achim Walter und Dr. Uwe Rascher wäre diese Arbeit so nicht zustande gekommen. Danke.

Schließlich möchte ich meinen Eltern danken. Ohne Ihre Unterstützung wäre es nie zu dieser Arbeit gekommen.

