

## Informationen zum Referenten

**M.Sc. Engineering, Dipl.-Ing. FH  
Martin Brand**



### **Aktuelle Position**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IMS Institut für Mechatronische Systeme, Winterthur, Schweiz

[www.ims.zhaw.ch](http://www.ims.zhaw.ch)

[martin.brand@zhaw.ch](mailto:martin.brand@zhaw.ch)

### **Ausbildung**

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, Schweiz

- 2008-2012: Master of Science in Engineering
- 2006-2008: Dipl.-Ing. FH in Mechatronik

Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz

- 2002-2005: Grundstudium Elektrotechnik, 1. Vordiplomprüfung abgeschlossen

Kantonsschule Heerbrugg, Heerbrugg, Schweiz

- 1997-2001: Maturitätstypus C

### **Berufliche Meilensteine**

Institut für Mechatronische Systeme, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Winterthur, Schweiz

- 2012-20xx: Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Computer Vision, Support Lehre
- 2008-2012: Wissenschaftlicher Assistent, Computer Vision, Support Lehre

StarragHeckert AG, Rorschach, Schweiz

- 2005-2006: Praktikum in der Konstruktionsabteilung

# Blattflächenbestimmung mittels Stereo-Bildverarbeitung

M.Sc. Engineering, Dipl.-Ing. FH Martin Brand, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IMS Institut für Mechatronische Systeme

Dipl.-Ing. Vincent Meiser, ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, IMS Institut für Mechatronische Systeme

## Zusammenfassung

In der heutigen Landwirtschaft hält die Automatisierung, wie in vielen anderen Branchen, vermehrt Einzug. Hierbei gewinnen die Erfassung und Auswertung wichtiger Parameter von Nutzpflanzen, wie z.B. die Feuchtigkeit des Bodens, die Anzahl, Grösse und Position von Früchten sowie der Blattflächenindex, immer mehr an Bedeutung. Diese Daten dienen dazu, Ressourcen (Wasser, Düngemittel, etc.) gezielt und schonend einzusetzen und ermöglichen dadurch eine ökonomisch und ökologisch nachhaltige Bewirtschaftung. Beispielsweise bei der Bewässerung einer Obstplantage wird heutzutage selten Rücksicht auf die Bedürfnisse einzelner Bäume in der Plantage genommen. Dies führt dazu, dass einige Bäume mehr Wasser erhalten als sie benötigen, während andere einen Mangel an Wasser erleiden. Die Bestimmung der Anzahl und Grösse von Früchten ermöglicht zudem eine Prognose des erwarteten Ertrages und der Qualität der Früchte, was die Planung der Ernte erleichtert und mögliche finanzielle Risiken verringert.

Diese Thematik wurde im Rahmen eines europäischen Forschungsprojektes mit dem Namen 3D-Mosaic behandelt. Ziel dieses Projektes ist es, ein System zur Entscheidungsfindung (Decision Support System) zu erstellen, um Obstplantagen Ressourcenschonend zu bewirtschaften. Am Institut für Mechatronische Systeme wurde unter anderem die Bestimmung des Blattflächenindex von Bäumen mittels Farb-Stereoaufnahmen durchgeführt. Dazu sind in Zusammenarbeit mit dem Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim Messungen an Plantagen-Obstbäumen vorgenommen worden, wobei unter anderem Aufnahmen mittels einer Point Grey BumblebeeXB3 Stereokamera gemacht worden sind. Die Farbbilder wurden mittels unterschiedlicher, zuvor auf ihre Tauglichkeit für diese Anwendung getesteten Stereoalgorithmen in 3D-Punktwolken umgewandelt. Diese wurden anschliessend mittels Triangulation zu einer Dreiecksvermaschung verarbeitet, die die Flächenberechnung der Einzelblätter des Baumes ermöglicht. Der Vergleich mit der ground truth, sprich dem wahren Wert der Blattfläche von Testbäumen, liefert eine erste Näherung für die gesamte Blattoberfläche eines Baumes. Der resultierende Blattflächenindex liefert einen wesentlichen Parameter für die Erstellung eines Decision Support Systems.

## Einführung

### Aufgabenstellung und Motivation

Im Rahmen des EU-Projektes 3D-Mosaic (3D-Mosaic, 2011) sollte ein Verfahren zur Bestimmung der Blattfläche von Obstbäumen entwickelt werden. Die Verwendung von Stereoaufnahmen erlaubt dabei sowohl eine automatische Verarbeitung der Daten, ermöglicht aber auch eine manuelle Auswertung oder Überwachung durch einen Menschen, falls dies erforderlich ist. Durch die Aufnahme eines kompletten Obstbaumes mittels einer Stereokamera kann die effektive Blattfläche eines Baumes in effizienter Art und Weise bestimmt und daraus folgend kann dann wiederum der Blattflächenindex errechnet werden.

Bisher angewandte Methoden für die Blattflächenbestimmung verwenden beinahe ausschliesslich zweidimensionale Daten. Bei reinen 2D-Methoden wird die Orientierung der einzelnen Blätter vernachlässigt und eine mittlere Fläche pro Pixel angenommen. Die Anzahl der Pixel, welche zu Blättern gehören, werden mit diesem Faktor multipliziert. Die Erfassung von 3D-Daten geschieht in der Regel mit Laserscannern, welche im Vergleich zu einer Stereokamera wesentlich langsamer und teurer sind. Zudem ist die gleichzeitige Erfassung der korrespondierenden Farbwerte nicht ohne zusätzliches Equipment (Farbkamera) möglich.

Durch die Verwendung von Farbstereoaufnahmen können die einzelnen Blätter rekonstruiert werden und auf Basis einer Segmentierung ist die exakte Bestimmung der Gesamtfläche aller sichtbaren Blätter möglich. Aufgrund der schnellen und einfachen Aufnahmetechnik ist es ausserdem möglich, ohne wesentlichen Mehraufwand Aufnahmen von zwei Seiten eines Baumes zu machen, was die Zuverlässigkeit der Blattflächenbestimmung deutlich erhöht.

## Theoretische Grundlagen

### Disparität und Tiefenberechnung

Mittels Stereo-Bildverarbeitung können 3D-Daten einer Szene rekonstruiert werden, welche mit zwei oder mehr Kameras simultan aufgenommen wurde. Dabei werden im Normalfall zwei Kameras verwendet, die eine horizontale Verschiebung aufweisen, die sogenannte Basis. Ähnlich dem menschlichen Sehen, kann die 3D-Information eines Bildpunktes dann aus der sogenannten Disparität durch Triangulation abgeleitet werden. Bei diesem Prinzip wird die Tatsache genutzt, dass Objekte, die sich näher an der Kamera befinden, eine grössere Verschiebung parallel zur Basis der Kameras aufweisen, als es bei weiter entfernten Objekten der Fall ist (siehe Abbildung 1).

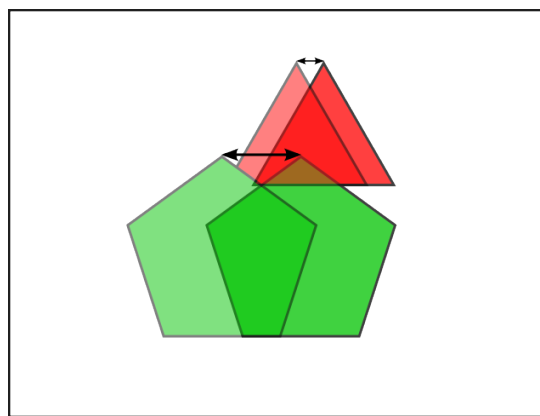


Abbildung 1 Visualisierung der Disparität. Objekte, die sich näher am Auge des Betrachters/an der Kamera befinden, erfahren eine stärkere Verschiebung.

Die Disparität  $d$  verhält sich dabei umgekehrt proportional zur Entfernung  $z$  und direkt proportional zu der Brennweite  $f$  der Kameralinse und zu der Basis  $b$  zwischen den Kameras.

$$d = \frac{bf}{z}$$

Um die Disparität zu berechnen, müssen zueinander korrespondierende Pixel in den jeweiligen Bildern gefunden werden. Im Idealfall sollte dabei für jeden Bildpunkt eine einzige Korrespondenz gefunden werden, damit eine möglichst dichte Punktwolke berechnet werden kann. Die Korrespondenzen von Bildpunkten in einem (linken) Bild liegen dabei auf sogenannten Epipolarlinien im anderen (rechten) Bild. Diese schneiden sich im nicht rektifizierten Fall in der Abbildung des Kamerazentrums der linken Kamera. Um die Suche nach Korrespondenzen zu vereinfachen, werden die Bilder rektifiziert (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3), d.h. die Kameraparameter (Brennweite, Bild-Hauptpunkt, relative Rotation und Translation) müssen so angepasst werden, dass die Epipolarlinien parallel verlaufen und auf derselben Zeile liegen wie die gesuchte Korrespondenz im jeweils anderen Bild.

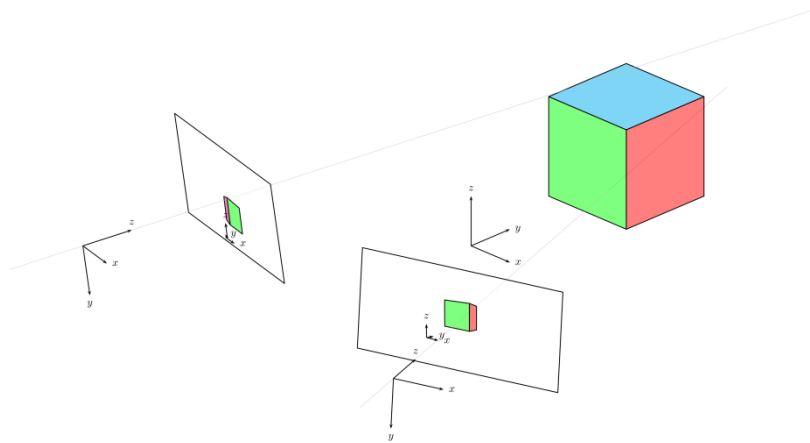


Abbildung 2 Allgemeine Orientierung zweier Kameras

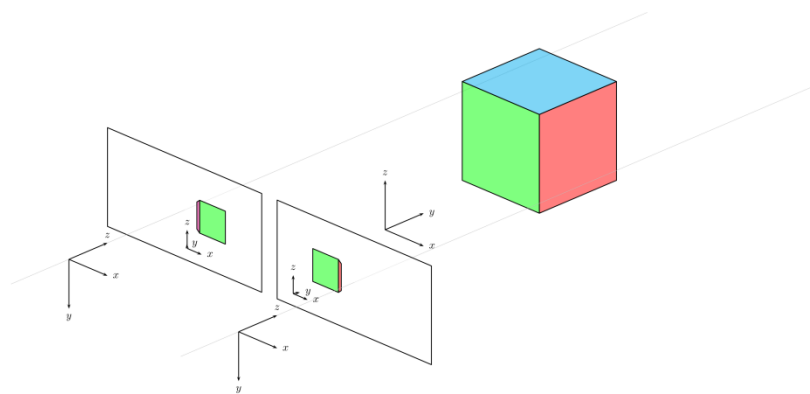


Abbildung 3 Ideale Orientierung zweier Kameras

Die Suche von Korrespondenzen ist das Kernproblem der Stereo-Bildverarbeitung. Die am häufigsten verwendete Methode ist dabei das Blockmatching, wobei eine rechteckige Region um ein Pixel mit einer gleich grossen Region im Referenzbild verglichen wird. Dabei gibt es unterschiedliche Methoden für die Vergleichsoperation wie z.B. „sum of absolute differences“ (SAD), „sum of squared differences“ (SSD) oder die Kreuzkorrelation. Dabei wird die Disparität ausgewählt, für welche die Vergleichsoperation den „besten“ Wert, sprich die geringsten Korrespondenzkosten ergibt. Um die Zuverlässigkeit der Resultate zu erhöhen, können beide Bilder jeweils einmal als Referenzbild verwendet werden. Werden bei beiden Durchläufen die gleichen Korrespondenzen ermittelt, so stimmen die Disparitäten überein. Dies ist ein klares Indiz für die Richtigkeit des Matchings.

Eine ausführliche Übersicht verschiedener Stereoalgorithmen und deren Klassifizierung kann in (Scharstein and Szeliski, 2002) gefunden werden.

## Experimente

Für die Experimente wurde eine Point Grey Bumblebee XB3 Stereokamera verwendet. Sie besitzt drei Bildsensoren in linearer Anordnung, jeweils mit einer Auflösung von 1280 x 960 Pixel pro Sensor. Dies erlaubt die Verwendung von drei unterschiedlichen Basislängen (kalibriert und rektifiziert):  $LC = 0.120m$ ,  $LR = 0.239m$  und  $CR = 0.119m$  (Hier wurden die Kameras mit L, C und R für *left*, *center* und *right* bezeichnet, bezogen auf die Blickrichtung der Sensoren.)



Abbildung 4 Point Grey Bumblebee XB3

(Quelle: [http://www.ptgrey.com/products/bbxb3/bumblebee2\\_xb3\\_datasheet.pdf](http://www.ptgrey.com/products/bbxb3/bumblebee2_xb3_datasheet.pdf))

Eine Liste der implementierten und getesteten Algorithmen kann in Tabelle 1 gefunden werden.

---

OpenCV Implementierung von SAD (sum of absolute differences) Blockmatching. Nur für Graustufenbilder verwendbar

---

OpenCV Implementierung von Hirschmüllers Algorithmus (Hirschmuller, 2008)

---

AD-census (Mei et al., 2011), der zum Zeitpunkt der Experimente führende Algorithmus im Middlebury Ranking (Scharstein and Szeliski, 2012)

---

SAD (sum of absolute differences) Blockmatching

---

SSD (sum of squared differences) Blockmatching

---

NCC (normalized cross correlation) Blockmatching

---

RANK transform Blockmatching, (Zabih and Woodfill, 1994) (Banks and Corke, 2001)

---

Zero-mean Versionen von SAD, SSD und NCC Blockmatching (der Mittelwert der zu vergleichenden Regionen wurde zuerst subtrahiert): ZSAD, ZSSD, ZNCC

---

„Pyramid“ Versionen von SAD und SSD, welche eine Summe der Vergleichskosten über sukzessiv kleiner werdende Regionen bilden.

---

**Tabelle 1 Liste der implementierten Algorithmen**

## Testobjekte mit bekannter Geometrie

Um die Genauigkeit der Rekonstruktion aus den Disparitätsbildern zu testen, wurden Aufnahmen von Objekten mit bekannter Geometrie verwendet. Anschliessend wurde die bekannte geometrische Form (im vorliegenden Beispiel Ebenen) in die resultierenden 3D-Daten geschätzt. Für die Genauigkeitsabschätzung wurden sowohl die Planarität der Ebenen als auch die Winkel zwischen den Ebenen betrachtet.

Die Testobjekte wurden aus Styropor gefertigt und zur verbesserten Korrespondenzfindung mit einem zufälligen Farbmuster versehen.

Das Testobjekt „Wall“ (siehe Abbildung 5 links) ist ein flaches Objekt mit den Dimensionen 448mm x 448mm x 20mm und diente der Untersuchung der Planarität der rekonstruierten 3D-Daten. Das Objekt „Blocks“ besteht aus zwei aufeinander geklebten Würfeln mit den Dimensionen 200mm x 200mm x 200mm und 150mm x 150mm x 150mm (siehe Abbildung 5 rechts). Diese Anordnung erlaubt die Untersuchung der Winkel zwischen den unterschiedlichen Seiten der Würfel.

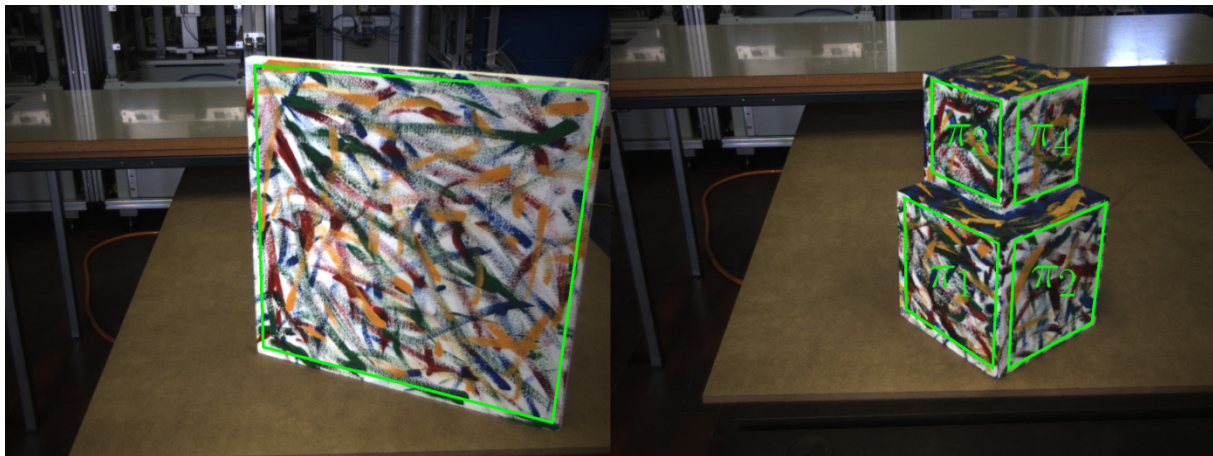


Abbildung 5 Testobjekte "Wall" links und "Blocks" rechts. Die Bereiche, welche für die Berechnung der Ebenen verwendet worden sind, wurden in grün markiert.

Die Auswertung der Testmessungen ergab, dass mit den Algorithmen Hirschmüller und Blockmatching mit normalisierter Kreuzkorrelation (normalized cross correlation, NCC) die besten Ergebnisse erzielt werden konnten. Sowohl die Menge an Ausreissern (siehe Abbildung 6) als auch die Genauigkeit der Rekonstruktion der Winkel zwischen den Ebenen des „Blocks“-Testobjektes wurden dabei als Kriterien herangezogen.

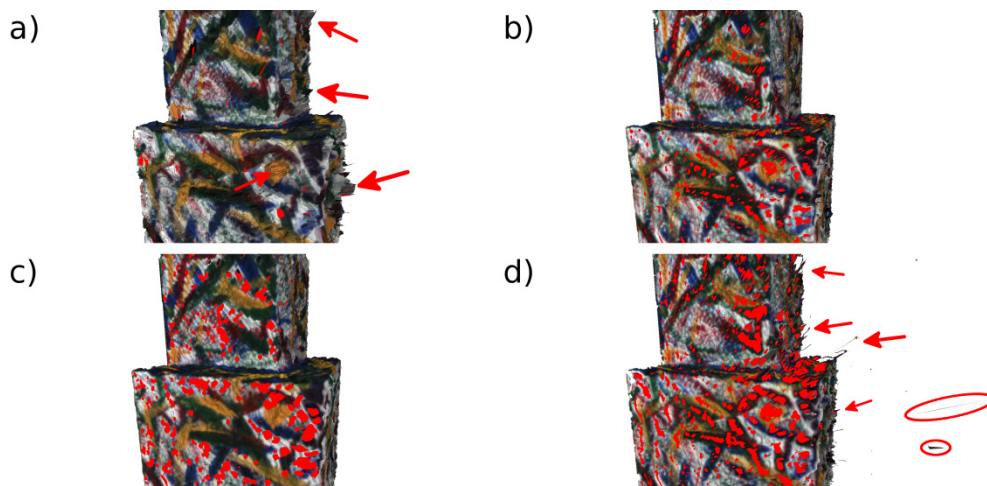


Abbildung 6 Rekonstruktionsergebnisse für vier ausgewählte Algorithmen. a) AD-Census, b) NCC Blockmatching, c) OpenCV Implementierung von Hirschmüllers Algorithmus, d) SAD Blockmatching. Fehler in der Rekonstruktion sind rot markiert.

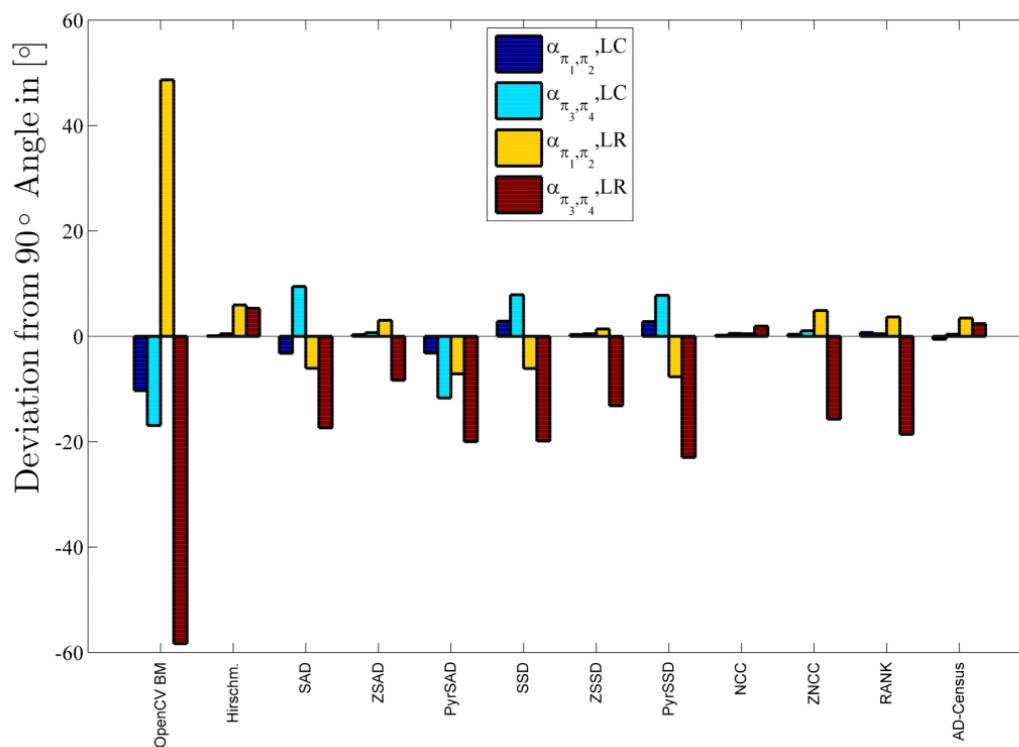


Abbildung 7 Abweichung vom idealen 90° Winkel für die unterschiedlichen getesteten Algorithmen.

Wie in Abbildung 7 gesehen werden kann, waren die Fehler bei der Winkelrekonstruktion grösser für die längere Basis  $LR$  als für die kürzere Basis  $LC$ . Auch konnten die Winkel zwischen den beiden grösseren Ebenen  $\pi_1$  und  $\pi_2$  genauer rekonstruiert werden als für die beiden kleineren Ebenen  $\pi_3$  und  $\pi_4$ . Dies entspricht den Erwartungen, da für die grösseren Ebenen mehr Datenpunkte für die Geometrieschätzung zur Verfügung standen.

## Blattflächenbestimmung mit einem Ficus

In einem anderen Experiment wurde die Methode zur Blattflächenbestimmung an einem kleinen Baum (*Ficus microcarpa*) getestet. Dazu wurde der Baum zunächst in drei Abständen von 3 m, 2 m und 1 m für jeweils 12 verschiedene Orientierungen mit einem Winkelversatz von  $30^\circ$  aufgenommen. Danach wurden alle Blätter mit einem Flachbettscanner mit einer Auflösung von 300 dpi digitalisiert. Aus den 445 einzelnen Blättern wurde dann eine effektive Blattoberfläche ( $0.274866 \text{ m}^2$ ) berechnet. Dieser Wert diente als Referenzwert (ground truth) für die Ergebnisse, welche mit den 3D-Daten resultierend aus den Stereoalgorithmen ermittelt wurden.

Da die Bilder zum Teil zu dunkel waren (siehe Abbildung 8), wurden sie nach der Rektifizierung bearbeitet:

1. Konvertierung des RGB-Bildes in den HSV-Farbraum (Hue, Saturation, Value)
2.  $S \rightarrow S^{0.5}$
3.  $V \rightarrow V^{0.25}$
4. Rückkonvertierung in den RGB-Farbraum



Abbildung 8 Beispielbild für die Vorverarbeitung anhand eines Ficus-Bildes. Links: original, rechts: nach der Vorverarbeitung

Danach wurden mit denselben Stereoalgorithmen wie im ersten Experiment („Wall“ und „Blocks“) die Punktwolken für die Bilder berechnet.

Um den Einfluss von Ausreißern zu vermindern, wurde das Tiefenbild (die z-Komponente) der 3D-Daten mit einem 3x3 Medianfilter geglättet und die x- und y-Komponenten der Punkte wurden aus der veränderten z-Komponente und den Kalibrierdaten neu berechnet. Zur Berechnung der Blattfläche mussten die Pixel erkannt werden, welche zu Blättern gehören. Ein Pixel wurde als Blatt klassifiziert, wenn es folgende Bedingungen erfüllte:

- Das Pixel musste sich innerhalb eines manuell festgelegten Rechteckes befinden
- $\lambda G > R \wedge \lambda G > B$  für RGB Werte, mit  $\lambda = 0.95$

- $0.1 \leq H \leq 0.6$  für den Hue-Wert

Die so ausgewählten Punkte wurden mittels Delaunay-Triangulation in eine Dreiecksvermaschung überführt, mit der Einschränkung, dass die Kantenlänge der resultierenden Dreiecke nicht grösser als 3 cm bzw.  $\sqrt{2}$  Pixel sein durften. Anschliessend wurde die Gesamtfläche aller Dreiecke bestimmt:

$$\sum_{\Delta_i} A_{\Delta_i} = \sum_{\Delta_i} \frac{\|\vec{a}_i \times \vec{b}_i\|}{2}$$

Dabei sind  $\vec{a}_i$  und  $\vec{b}_i$  zwei Vektoren, welche ein einzelnes Dreieck  $\Delta_i$  aufspannen.

Bei der Auswertung der Resultate liegt die Vermutung nahe, dass 50 % der Blattfläche sichtbar sind, wenn ein Baum aus einer Richtung aufgenommen wird. Dieser Wert wurde von Hirschmüllers Algorithmus (siehe Abbildung 9) für die Entfernungen von 3 m und 2 m und der Verwendung der kürzeren Basis  $LC$  sogar übertroffen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass dieser Algorithmus zusätzliche Schritte ausführt, um ein dichtes Disparitätsbild zu berechnen.

Bei Betrachtung der durchschnittlichen Prozentzahl der Blattfläche in Relation zur Gesamtfläche über alle 12 Orientierungen kann ein deutlicher Effekt der Vorverarbeitung für die meisten Stereoalgorithmen gesehen werden. Dieser Effekt ist für alle Distanzen und bei beiden untersuchten Basislängen feststellbar. Es kann auch festgestellt werden, dass je geringer die Entfernung der Kamera zum Baum ist, die Blattfläche kleiner wird. Auch liefert die Benutzung der grösseren Basis deutlich kleinere Werte für die Blattfläche.

Die Erklärung für den Einfluss der Vorverarbeitung ist, dass ohne diese die dunklen Bereiche zu wenig Kontrast aufweisen, um zuverlässig Korrespondenzen zu finden, da in diesen Bereichen das additive Rauschen des Bildsensors einen grösseren Einfluss hat als in helleren Bereichen. Je kleiner die Distanz zum Baum oder je grösser die Basis, desto ausgeprägter werden auch die perspektivischen Verzerrungen, welche die Korrespondenzfindung weiter erschweren.

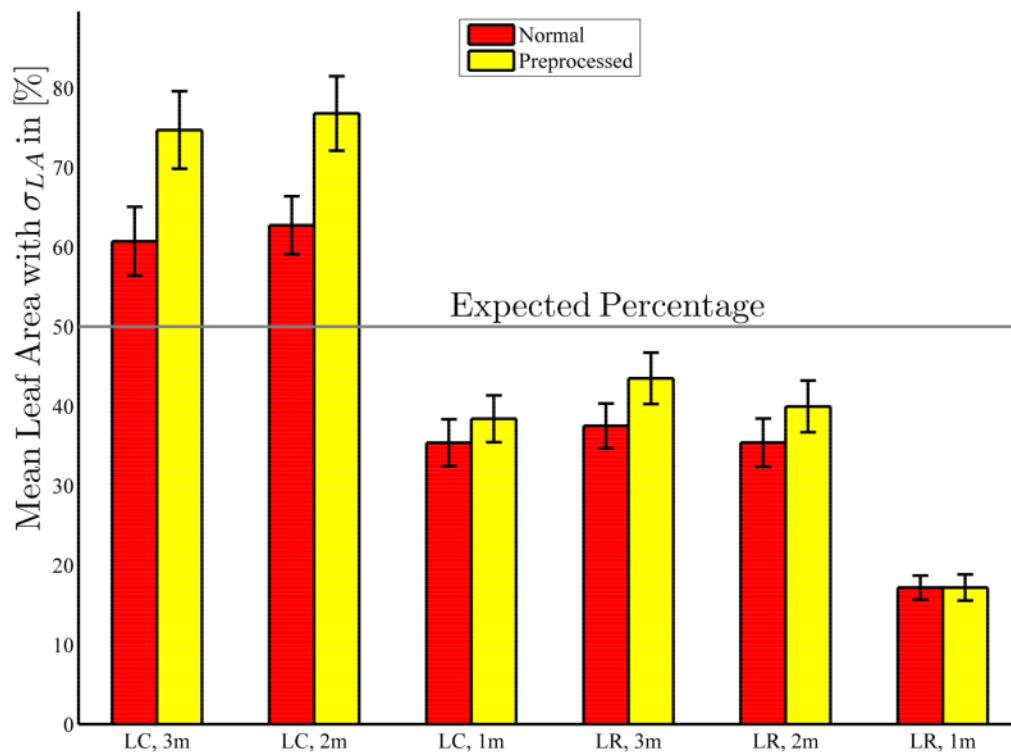


Abbildung 9 Ergebnisse der Blattflächenbestimmung für den Ficus, berechnet mit der OpenCV Implementierung von Hirschmüllers Algorithmus. Dargestellt wird der prozentuale Anteil der Gesamtfläche.

Von allen getesteten Algorithmen erzielten Hirschmüllers Algorithmus und NCC Blockmatching die besten Resultate, weshalb diese beiden für weitere Experimente verwendet wurden.

### Blattflächenbestimmung in einer Plantage (Beispiel: Potsdam-Marquardt)

In diesem Experiment wurden die Blattflächen für Obstbäume in einer Plantage berechnet. Die Aufnahmen wurden im August 2012 in Potsdam gemacht und umfassen 6 Reihen mit jeweils 30 Bäumen, die von zwei Seiten aufgenommen wurden. Um die Blätter der Bäume besser von Vegetation im Hintergrund trennen zu können, wurde ein schwarzes Tuch hinter die Bäume gehalten.

Die Vorverarbeitung der Bilder wie im vorherigen Experiment wurde auch hier durchgeführt. Die Selektion von Pixeln, welche als Blatt klassifiziert werden, folgte in diesem Experiment jedoch anderen Regeln:

- $z \leq 5.5m$ , um Punkte weiter im Hintergrund zu entfernen.
- $R < W \wedge G < W \wedge B < W$  für RGB Werte, mit  $W=250$  als Schwellwert, um helle Pixel zu entfernen. Diese gehörten hauptsächlich zu Bildregionen, welche Himmel enthielten. Ebenso wurden nur zusammenhängende Komponenten mit einer Größe  $S_W \geq 500pixel$  berücksichtigt.
- $R > K \wedge G > K \wedge B > K$  für RGB Werte, mit  $K=40$  als Schwellwert, um dunkle Pixel zu entfernen. Diese gehörten hauptsächlich zum schwarzen Tuch im Hintergrund.
- Aus den weissen und schwarzen Pixeln wurde eine Maske erstellt und Kanten in dieser Maske wurden benutzt, um Linien mittels der Hough-Transformation zu finden. Der Grund war, dass das Tuch lange gerade Kanten besass, welche den Hintergrund vom Vordergrund abtrennten. Linien, welche eine

Länge  $l > 120\text{pixel}$  und eine Abweichung von  $\pm 10^\circ$  von der Horizontalen oder Vertikalen besessen, wurden benutzt, um Pixel ausserhalb des Tuches im Hintergrund zu entfernen.

- $\lambda G > R \wedge \lambda G > B$  für RGB Werte, mit  $\lambda = 2.0$
- $0.1 \leq H \leq 0.6$  für den Hue-Wert

Basierend auf den Resultaten der vorherigen Experimente wurden die 3D-Daten nur mit Hirschmüllers Algorithmus und NCC Blockmatching berechnet, da diese sowohl in Bezug auf die Rekonstruktionsgenauigkeit der Testobjekte als auch bei der vorherigen Blattflächenbestimmung mit dem Ficus die besten Resultate geliefert hatten.

Die Blattflächen wurden für alle Bäume und beide Ansichten berechnet, wobei die Methode der Berechnung die gleiche war wie im vorherigen Experiment. Im Unterschied zum vorherigen Experiment standen nicht für alle, sondern nur für zwei der Bäume Vergleichsdaten zur Verfügung. Diese beiden Bäume sind mit künstlichen Blättern aus Papier bestückt worden, deren Gesamtfläche bekannt war. Die Ergebnisse für diese beiden Bäume für Hirschmüllers Algorithmus mit Vorverarbeitung der Bilder können in Tabelle 2 gefunden werden. Auch wurden für alle Bäume die Blattflächen mittels eines 2D-Verfahrens bestimmt, wobei die Anzahl der Pixel, welche als Blätter klassifiziert worden sind, mit einer Einheitsfläche von  $9.45 * 10^{-6} [\text{m}^2/\text{Pixel}]$  multipliziert worden sind.

Baum (Reihe/Nr.)	Fläche An- sicht 1 [ $\text{m}^2$ ]	Fläche An- sicht 2 [ $\text{m}^2$ ]	Fläche gesamt mittels Stereo [ $\text{m}^2$ ]	Vergleichsfläche [ $\text{m}^2$ ]	Fläche gesamt mittels 2D-Verfahren [ $\text{m}^2$ ]
1/25	3.052	3.739	6.791	8.796	2.756
4/105	1.608	1.112	2.720	3.831	1.591

**Tabelle 2 Ergebnisse für die zwei Bäume, für die Vergleichsdaten zur Verfügung standen. Die Resultate stammen von Hirschmüllers Algorithmus mit Vorverarbeitung der Bilder.**

## Fazit

Es wurde ein Verfahren implementiert, das die Bestimmung der Fläche der sichtbaren Blätter an einem Baum ermöglicht. Die Verwendung von Stereokameras erlaubt dabei eine effiziente und flächendeckende Erfassung von Rohdaten für Bäume in einer Plantage. Es können in kurzer Zeit mehrere Ansichten eines Baumes aufgenommen werden. Diese redundante Datenerfassung erhöht die Robustheit des Auswertalgorithmus. Das Verfahren wurde sowohl unter Laborbedingungen, als auch im Feldversuch getestet.

Von den verwendeten Stereoalgorithmen wurden zwei Kandidaten für weitere Untersuchungen ausgewählt, nämlich Hirschmüllers Algorithmus und das NCC Blockmatching, da diese die vielversprechendsten Ergebnisse geliefert hatten.

Durch die Feldaufnahmen in der Plantage hat sich gezeigt, dass diese Algorithmen für die Anwendung ausserhalb des Labors jedoch nur bedingt anwendbar sind, da sie noch sehr anfällig sind für Einflüsse wie z.B. Beleuchtung oder Abstand zum Objekt. Bei Hirschmüllers Algorithmus kommt noch dazu, dass eine grosse Zahl von Parametern eingestellt werden können. Ausserdem wird die Korrespondenzfindung weiter erschwert durch die Tatsache, dass beinahe ausschliesslich sehr ähnliche Grüntöne vorkommen.

Abhängig vom Entwicklungsgrad der Bäume besitzen diese unterschiedliche Grössen, was das Abschätzen einer optimalen Entfernung erschwert. Damit aber die Auflösung der einzelnen Blätter ausreichend bleibt, ist ein Abstand von 1.5m-2.5m empfohlen, auch wenn dabei einige Bäume nicht komplett abgebildet werden.

Die Verwendung des schwarzen Tuchs als Hintergrund hat einerseits den Vorteil, dass die Segmentierung des Baumes vereinfacht wird. Der Nachteil ist aber, dass es einen gewissen Mehraufwand bedeutet und in einem automatisierten Ablauf eher hinderlich wäre.

Bei weiteren Experimenten, vor allem bei Aufnahmen im Felde, sollte darauf geachtet werden, dass die Szene homogen ausgeleuchtet ist. Dies ist beispielsweise bei leichter Bewölkung der Fall. Eine punktförmige Lichtquelle, wie sie die Sonne bei direkter Einstrahlung darstellt, ist zu vermeiden. In diesem Zusammenhang könnten auch Versuche mit HDR (High Dynamic Range)-Bildern interessant sein, da so auch „Löcher“ im Blätterwerk mit gutem Kontrast erfasst werden könnten.

## Literatur

- 3D-Mosaic, 2011. 3d-mosaic [WWW Document]. URL <http://www2.atb-potsdam.de/3d-mosaic/>
- Banks, J., Corke, P., 2001. Quantitative Evaluation of Matching Methods and Validity Measures for Stereo Vision. *The International Journal of Robotics Research* 20, 512–532.
- Bradski, G., 2000. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*.
- Hirschmuller, H., 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 30, 328 –341.
- Mei, X., Sun, X., Zhou, M., Jiao, S., Wang, H., Zhang, X., 2011. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware, in: *Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference On*. pp. 467 –474.
- Point Grey Research Inc., 2012. Point Grey CCD and CMOS Digital Cameras for Industrial, Machine, and Computer Vision [WWW Document]. URL <http://www.ptgrey.com/>
- Scharstein, D., Szeliski, R., 2002. A Taxonomy and Evaluation of Dense Two-Frame Stereo Correspondence Algorithms. *International Journal of Computer Vision* 47, 7–42.
- Scharstein, D., Szeliski, R., 2012. Middlebury Stereo Vision Page [WWW Document]. URL <http://vision.middlebury.edu/stereo/>
- Zabih, R., Woodfill, J., 1994. Non-parametric Local Transforms for Computing Visual Correspondence. *Springer-Verlag*, pp. 151–158.