

LAGEERFASSUNG VON SATELLITEN MITTELS BILDVERARBEITENDER STERNMUSTERERKENNUNG

Hartmut Renken
Heilshorner Str. 30
28239 Bremen
Tel.: 0421 / 6940114

EINLEITUNG:

Die in diesem Beitrag vorgestellte Arbeit soll zeigen, wie es möglich ist, unbekannte Sternmuster automatisch durch ein rechnergestütztes Bildverarbeitungssystem identifizieren zu lassen. Ein möglicher weiterverarbeitender Schritt ist die Bestimmung der Lage z eines Satelliten (Bild 1) bei geeigneter Ausrichtung einer Kamera zur Satellitenstruktur. Die Grundidee zur Sternmustererkennung basiert auf dem Vergleich zwischen den Positionen von Sternen auf einer zu untersuchenden Himmelsaufnahme einerseits und Angaben der Himmelskoordinaten von Sternen innerhalb eines Sternkatalogs andererseits. Der Sternkatalog enthält die Wissensbasis zur Erkennung des über die CCD-Kamera aufgenommen und zur erkennenden Sternmusters.

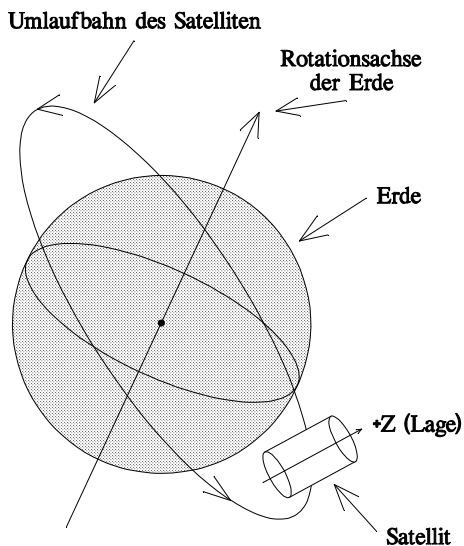


Bild 1: Erdumlaufbahn eines Satelliten mit zur bestimmender Lage z

Dem entworfenen, praktisch realisierten und in Feldversuchen erfolgreich erprobten Bildverarbeitungssystem steht eingangsseitig die Abbildung eines Himmelsausschnitts zur Verfügung, welche mit einer CCD-Kamera aufgenommen wurde. Die im Bild enthaltenen Himmelsobjekte werden segmentiert und zu dem zu erkennenden Sternmuster zusammengesetzt. Ein Korrelationsverfahren - auch *Matching* genannt - versucht dieses Sternmuster durch die Zusammensetzung von Sternen eines Sternkatalogs

zu rekonstruieren. Anschaulich gesprochen bedeutet dies, daß das Bildverarbeitungssystem die Frage *welcher Stern ist das?* beantwortet [2], [6]. Wie eingangs erwähnt, können nachfolgend die Himmelskoordinaten der Bildmitte berechnet werden, welche bei geeigneter Kameraausrichtung innerhalb eines Satellitensystem gleichbedeutend mit dessen Lage z sein können (Bild 1 und 2). Andere Einsatzgebiete sind in der Schiffsnavigation oder für Teleskop- und Antennen-ausrichtung denkbar.

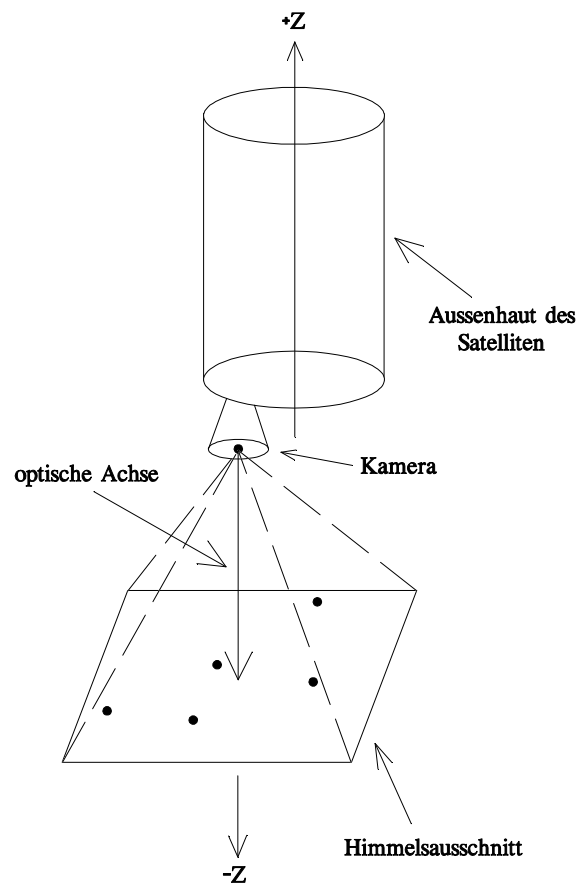


Bild 2: Himmelsaufnahme zur Bestimmung der Lage z

LÖSUNGSKONZEPT:

Das Lösungskonzept für die Sternmustererkennung erinnert an den typischen Aufbau von Bildverarbeitungssystemen [1] und wurde nach dem Prinzip *keep it simple* realisiert. Bild 3 zeigt die elementarsten und sequentiell abzuarbeitenden Schritte des Lösungskonzepts, welche wiederum verschiedene Unterprozeduren beinhalten.

Der Kern des Programms ist die Prozedur *Matchen der Sternkonfiguration mittels Sternkatalogdaten*. Die wesentlichen Inhalte der Verarbeitungsschritte des Bildverarbeitungssystems werden im folgenden stichwortartig vorgestellt:

Initialisierungen vornehmen und Sternkatalog laden:

- notwendige Initialisierungen der Variablen vornehmen
- Sternkatalogdatei laden
- Daten des Sternkatalogs generieren

Bilddaten von Kamera einlesen:

- Kamera initialisieren
- Aufnahme durch Kamera veranlassen
- Bilddaten in Bildverarbeitungssystem einlesen

Bilddatenvorverarbeitung:

- Histogramm erstellen
- kumuliertes Histogramm erstellen
- Grauwert des Bildes ermitteln
- Entscheidung auf Brauchbarkeit der Bilddaten für die Weiterverarbeitung

Objektsegmentierung:

- Bildposition heller Pixel in einer x-, y-Koordinatenliste ablegen
- Objektsegmentierung durchführen
- Flächenschwerpunkte der Objekte speichern

Erkennung der Sternkonfiguration mittels Sternkatalogdaten:

- Auswahl geeigneter Objekte / Sterne treffen
- Matchingalgorithmus auf Sternmuster anwenden

Lageberechnung der Bildmitte:

- Berechnung der äquatorialen Himmelskoordinaten der Bildmitte

Plausibilitätsüberprüfung der Lage durchführen:

- Verifizierung der Brauchbarkeit der berechneten aktuellen Lage durch Vergleich mit zeitlich vorherigen Lageinformationen

Parameterübergabe:

- Übergabe von ermittelter Lageinformation an weiterverarbeitende Module

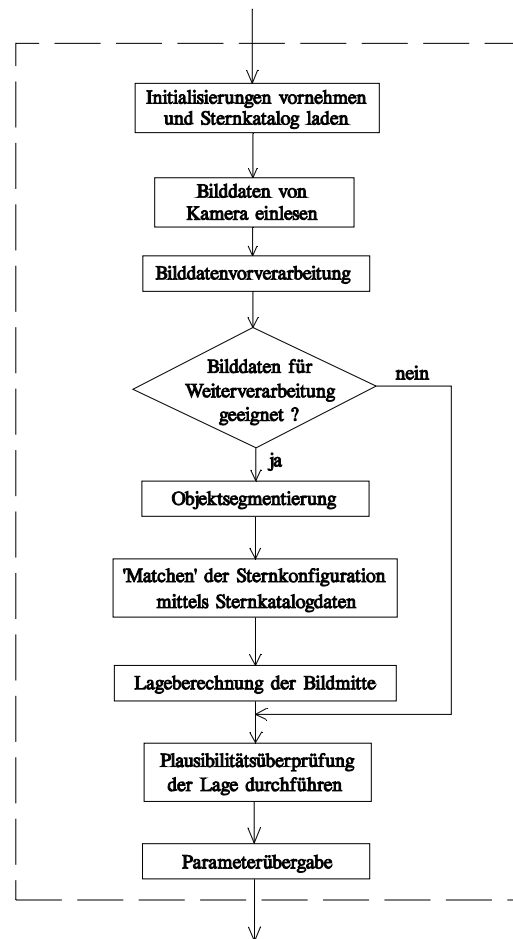


Bild 3: Lösungskonzept zur Lageerfassung mittels bildverarbeitender Sternmustererkennung

MATCHEN DER STERNKONFIGURATIONEN MITTELS STERNKATALOG-DATEN:

Der Algorithmus zur Erkennung von Sternmustern - das *Matching* - soll am Beispiel einer realen Himmelsaufnahme, die einen Ausschnitt aus dem Sternbild *Cassiopeia* zeigt, erklärt werden (Bild 4). Die Aufnahme wurde im Rahmen von Feldversuchen mit einer eigens für das Bildverarbeitungssystem entwickelten CCD-Kamera erzielt [3]. Die Kamera erzeugt ein digitales Binärbild, also Schwarzweißaufnahmen ohne Grauwertwiedergabe (1 Bit je Pixel). Die Belichtungszeit beträgt 1,1 Sekunden, in der Bilddiagonalen wird ein Winkel von 25 Grad (field of view) der Himmelskugel wiedergegeben. Es sind sechs Objekte (*number.obj=6*) zu erkennen, entsprechend sechs auch für das bloße Auge sichtbaren Sternen von *Cassiopeia*, die vom Bildverarbeitungssystem nach Bilddatenvorverarbeitung und Objektsegmentierung detektiert werden. Es gilt nun das in *Cassiopeia* vorliegende Sternmuster automatisch durch das Bildverarbeitungssystem erkennen zu lassen (Bild 4 und 5).

Eine Sortierung nach Objektgrauwerten ergibt folgende absteigende Reihenfolge der Sterne [5]:

- 1: α Cassiopeia (Schedir)
- 2: β Cassiopeia (Caph)
- 3: η Cassiopeia (Achird)
- 4: γ Cassiopeia (Cih)
- 5: δ Cassiopeia (Ksora, Rucha)
- 6: ϵ Cassiopeia (Segin)

Die Reihenfolge entspricht nicht genau die der visuellen Helligkeiten, da die spektrale Empfindlichkeit des Kamerasystems etwas anders ausgeprägt ist, als die des menschlichen Auges.

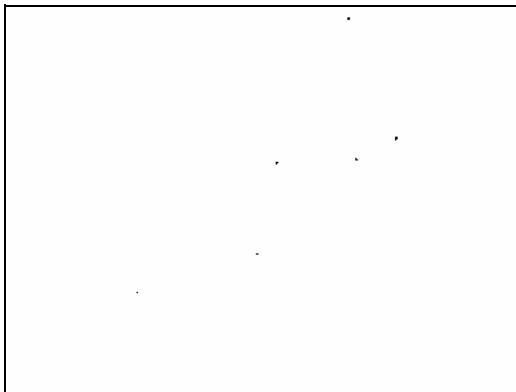


Bild 4: CCD-Aufnahme von *Cassiopeia*

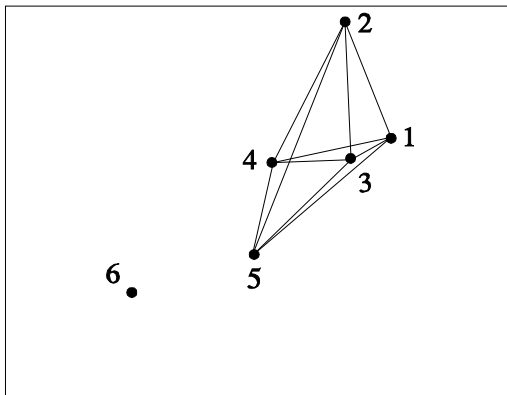


Bild 5: Winkelabstände zwischen den fünf hellsten Sternen von *Cassiopeia*

In den Listen $x.object[1..number.of.objects]$ und $y.object[1..number.of.objects]$ sind die jeweiligen Koordinaten der Objektflächenschwerpunkte der Sterne nach Durchlauf der Prozedur *Objektsegmentierung* gespeichert.

Bild 6 zeigt die Prozedur *Matchen der Sternkonfiguration mittels Sternkatalogdaten*. Das Matching wird bei Vorlage von nur zwei Objekten im Bild, also eines Doppelsterns, nicht durchgeführt, da bei der Sternmustererkennung zu

viele Mehrdeutigkeiten auftreten. Bei einem Sternkatalog, der 1370 Sterne bis zur 5. Magnitude umfaßt, können mitunter mehrere Hundert Doppelsterne in Frage kommen, wie das Beispiel in Bild 8 zeigt.

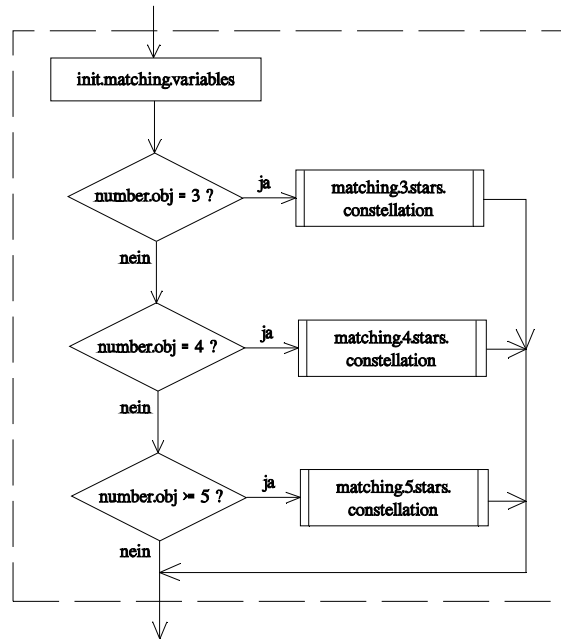


Bild 6: Auszuführende Matchingprozeduren je nach Anzahl der Objekte im Bild

Das Verfahren zur Erkennung des vorgegebenen Sternmusters basiert darauf, daß die Winkelabstände von Objekten miteinander verglichen werden, wobei immer die jeweils hellsten Objekte einer Aufnahme herangezogen werden. Die Sternmuster resultieren aus sämtlichen Verbindungslinien der Objekte untereinander, wie auch in Bild 5 zu sehen ist. Die zunächst vorliegenden Pixelabstände auf der Matrixstruktur des CCD-Sensors werden über einen Umrechnungsfaktor $angle.factor$ in Winkelabstände an der Himmelskugel umgerechnet. Objektivbrennweite und Pixelabmessungen des CCD-Sensor bestimmen den Umrechnungsfaktor $angle.factor$. Ferner wird eine Toleranz der Winkelabstände $grad.angle.delta$ zugelassen, die verschiedene Fehlereinflüsse, wie Abbildungsfehler der Aufnahmeoptik oder Ungenauigkeit des Sternkatalogs kompensieren.

Nun wird versucht mittels der im Sternkatalog enthaltenen Sterne und deren Himmelskoordinatenangaben das durch die Objekte im Bild erzeugte Sternmuster synthetisch aufzubauen. Falls dies gelingt, gilt das Sternmuster als erkannt. Der Sternkatalog umfaßt im allgemeinen alle Sterne, die durch die Kamera prinzipiell aufnehmbar sind, ist jedoch über die Sternkatalogdatei modifizierbar [2].

ERKENNUNG VON DREIER-KONSTELLATIONEN:

Nachfolgend wird der Matchingvorgang anhand der Erkennung einer Dreier-Konstellation detaillierter geschildert. Das Erkennen von Vierer- und Fünfer-Konstellationen stellt eine Erweiterung dessen dar, weil jeweils nur noch ein Stern bzw. zwei Sterne hinzugenommen werden, wobei nun alle Winkelabstände der vier bzw. fünf Objekte untereinander im Sternkatalog wiedergefunden werden müssen. Der Vorteil der Berücksichtigung von vier und fünf Objekten besteht darin, daß die Anzahl der erkannten Sternmuster drastisch reduziert wird, bishin zu einer eindeutigen Identifikation (Bild 9, 10 und 11).

Es werden zunächst einige Vorbereitungen für das Matching vorgenommen:

- Aus den Objektflächenschwerpunkten $x.object[1..3]$ und $y.object[1..3]$ werden die Pixelabstände $a.12$, $a.13$ und $a.23$ berechnet.
- Mittels des Umrechnungsfaktors $angle.factor$ erfolgt die Umrechnung der Pixelabstände in die Winkelabstände $angle.12$, $angle.13$ und $angle.23$.
- Die Toleranz der Winkelabstände $grad.angle.delta$ wird miteinbezogen. Dazu wird für die Objekte 1 und 2 der minimal zugelassene Winkel $angle.12.min$ und der maximal zugelassene Winkel $angle.12.max$ ermittelt. Entsprechend wird für die Objekte 1 und 3 sowie 2 und 3 verfahren.

Nun kommt die Wissensbasis des Sternkatalogs $cat.stars[1..number.of.stars]$ mit ins Spiel. Dieser liefert die Himmelskoordinaten aller Sterne ($number.of.stars$) für die Wissensbasis. Es wird jetzt versucht den Winkelabstand $angle.12$ der Objekte 1 und 2 unter Berücksichtigung der Winkeltoleranz $grad.angle.delta$ zu finden. Wird eine Doppelsternbasis $i1$ und $i2$ im Sternkatalog für die Objekte 1 und 2 gefunden, wird ein dritter Stern $i3$ aus dem Sternkatalog hinzugenommen und untersucht ob der Winkelabstand zu den Sternen $i1$ und $i2$ mit den Winkelabständen $angle.13$ und $angle.23$ der dazugehörigen Objekte in der Aufnahme übereinstimmt, wiederum unter Berücksichtigung der Winkeltoleranz. Wenn sich alle durch die Aufnahme vorgegebenen Winkelabstände im Sternkatalog durch ein Muster von drei Sternen wiederfinden lassen, gilt dieses als erkannt.

Mit den Indizes $i1$ und $i2$, bzw. den Objekten 1 und 2 werden alle möglichen Doppelsternbasen im Sternkatalog konstruiert. Der Index $i3$ für einen potentiellen dritten Stern wird gegebenenfalls von 1 bis $number.of.stars$ durchlaufen.

LAGEBESTIMMUNG:

Für den praktischen Einsatz im Satelliten bietet es sich an, die optische Achse der Kamera in Richtung der zu bestimmenden Lage z auszurichten (Bild 1 und 2). Die Himmels-koordinaten der Bildmitte geben die zu bestimmende Lage z wieder. Berechnungsverfahren hierfür sind in [2] und [6] zu finden.

Durch eine optionale Plausibilitätsüberprüfung der Lage werden Mehrdeutigkeiten untersucht, welche insbesondere bei Sternmustern bestehend aus drei Sternen auftreten. Zur Lösung dieser Aufgabe werden Lagewerte aus vorherigen Durchläufen des Bildverarbeitungssystems herangezogen, welche in einem sogenannten *Historienpuffer* zwischengespeichert werden [2].

Die durch das Bildverarbeitungssystem ermittelte Lage kann als *Ist-Größe* eines weiter-verarbeitenden Lageregelungssystem genutzt werden (Bild 7).

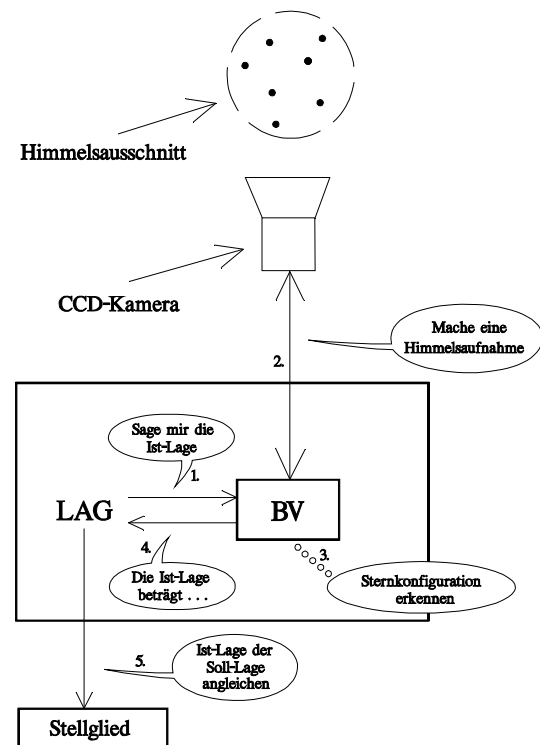


Bild 7: mögliches Zusammenspiel der Systeme Bildverarbeitung (BV) und Lageregelung (LAG)

BEISPIELE UND ERGEBNISSE:

Zur Veranschaulichung des Matchingalgorithmus werden auf die Aufnahme *Cassiopeia* (Bild 4) das 3-Sterne-, 4-Sterne- und 5-Sterne-Matching angewandt (Bild 9, 10 und 11). Zusätzlich wird das sonst nicht übliche 2-Sterne-Matching durchgeführt, um die enorme Vielfalt der möglichen Sternmuster zu zeigen, mit 353 gefundenen Doppelsternsystemen in diesem Beispiel (Bild 8). Softwareseitig wurden hierzu auf Personal-Computer lauffähige Programme implementiert, um z. B. das Laufzeitverhalten des Matchings, den Einfluß des Sternkatalogumfangs und verschiedener anderer Parameter zu untersuchen. Die Rechenperformance wird durch einen 486 DX2, 66 MHz Prozessor zur Verfügung gestellt. Grafische Ausgaben visualisieren die erkannten Sternmuster durch Verbindungslinien der einzelnen Sterne vor der mittels Zylinderprojektion dargestellten Himmelskugel (Bilder 8, 9, 10 und 11). Gleichzeitig werden die im Sternkatalog eingetragenen Sterne dargestellt. Der obere Rand des Grafikdisplays stellt den Himmelsnordpol dar, der untere Rand den Himmels-südpol. Mittig verläuft der Himmels-äquator. Der Sternkatalog umfaßt in diesem Beispiel mit 1370 Sternen alle Sterne bis zur 5. Magnitude; als Winkeltoleranz sind 0,2 Grad zugelassen. Der Umfang des Sternkatalogs und die Winkeltoleranz beeinflussen die Laufzeit des Matching erheblich. In den vorliegenden Beispielen beträgt die Rechenzeit 10 bis 12 Sekunden. Bei Anwendung des 3-Sterne-Matchings, also bei Erkennung der 3 hellsten Sterne aus der Aufnahme *Cassiopeia*, lassen sich 23 Muster dieser Art im Sternkatalog finden (Bild 8). Bei 4-Sterne-Matching werden nur noch 3 Muster gefunden (Bild 9), und beim 5-Sterne-Matching wird das Sternmuster eindeutig identifiziert (Bild 10) und entspricht dem realen Sternmuster am Himmel. Ähnliche Ergebnisse wurden mit alle anderen Aufnahmen aus Feldversuchen erzielt. Das 5-Sterne-Matching liefert in 95% aller Fälle eine eindeutige Identifizierung des Sternmusters. Die Voraussetzung zur Auffindung des zu erkennenden Sternmusters ist lediglich, daß die in der Aufnahme abgebildeten und zunächst unbekanntes Sterne, mit deren Himmelskoordinaten in der Wissensbasis des Sternkatalogs eingetragen sind. Informationen über die Helligkeiten von Sternen werden durch den Sternkatalog nicht mitgegeben.

SCHLUßBETRACHTUNG:

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bildverarbeitungssystem stellt ein Verfahren zur automatischen rechnergestützten Sternmustererkennung bereit und ist ein mögliches Werkzeug zur Lageerfassung von Satelliten. Feldversuche mit CCD-Kamera und Bildverarbeitungssystem haben gezeigt, daß das Verfahren zuverlässig arbeitet, bei Vorlage störungsfreier Himmelsaufnahmen [2], [3]. Liefert die Aufnahme ein aus mindestens fünf Sternen bestehendes Sternmuster, so wird dieses in 95% aller Fälle eindeutig bei einem bis zur 5. Magnitude umfassenden Sternkatalog erkannt. Sollten Mehrdeutigkeiten auftreten, können diese bei der Lageerfassung von Satelliten durch Hinzuziehen von Vorwissen auf eine eindeutige Lösung reduziert werden.

In zukünftigen Arbeiten wird eine weitere Reduzierung der Programmlaufzeit angestrebt, bishin zum Echtzeitverhalten. Ferner werden die Adaption von Kamera-, Bildverarbeitungssystem und Rechner eine kompakte und geschlossene Lösung in Form eines einzigen Moduls liefern.

LITERATURHINWEISE:

- [1] Wahl, F.M.: Digitale Bildsignalverarbeitung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1984
- [2] Renken, H.: Entwurf und Realisation eines bildverarbeitenden Systems zur automatischen Erkennung von Sternkonfigurationen. Diplomarbeit, Universität Bremen, 1992
- [3] Offterdinger, P.; Rodehorst, L.: Entwicklung und Aufbau eines Sternsensors. Diplomarbeit, Hochschule Bremen, 1993
- [4] Vehrenberg, H.; Blank D.: Handbook of the Constellations. Düsseldorf: Treugesell-Verlag, 1987
- [5] Wepner, W.: Mathematisches Hilfsbuch für Studierende und Freunde der Astronomie. Düsseldorf: Treugesell-Verlag, 1985
- [6] Königsmann, H.; Renken, H.; Rath, H.: Attitude Determination by Image Processing Algorithms. Proceedings of the sixth AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan/Utah, 1992

BEISPIELBILDER ZUR ERKENNUNG VON STERNMUSTERN:

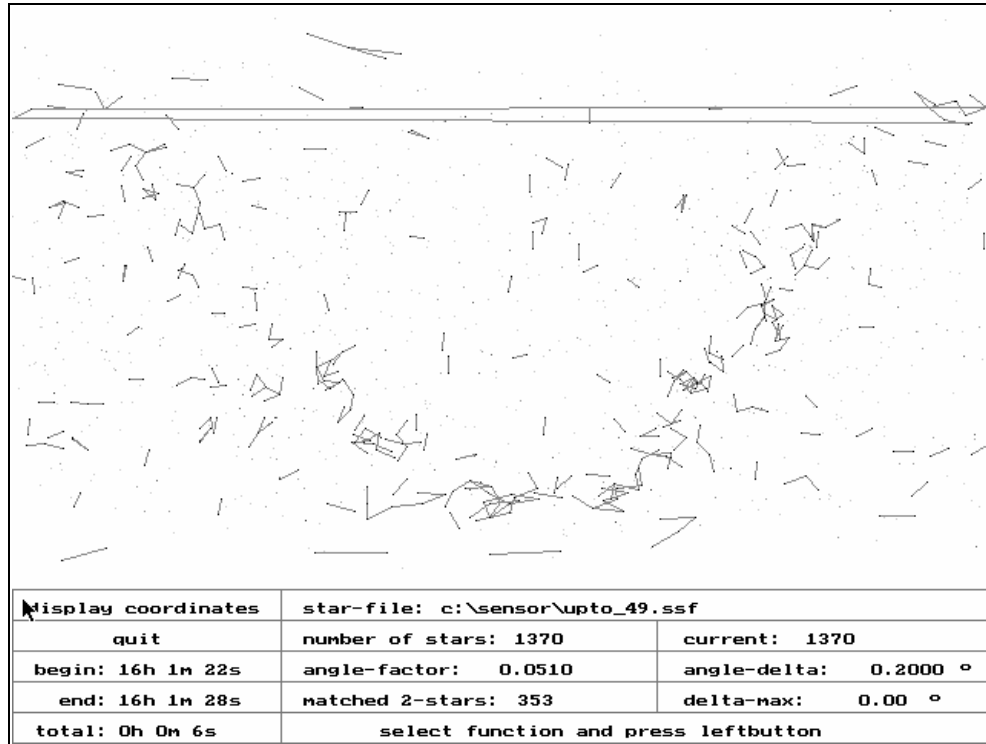


Bild 8: 353 erkannte Sternmuster aus *Cassiopeia* beim 2-Sterne-Matching

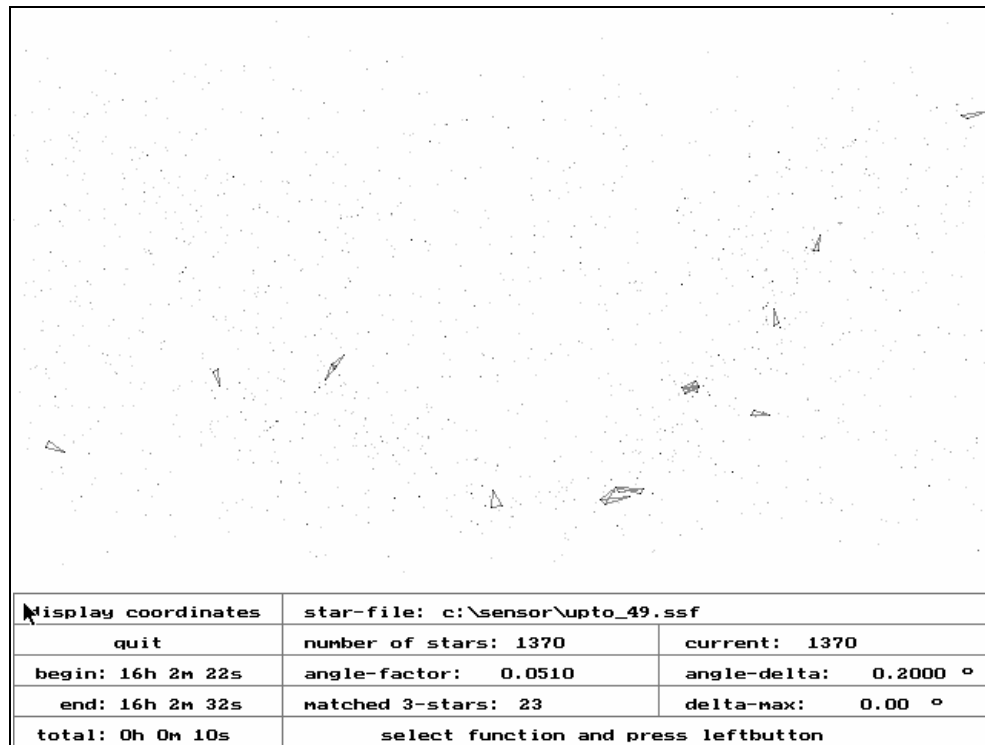


Bild 9: 23 erkannte Sternmuster aus *Cassiopeia* beim 3-Sterne-Matching

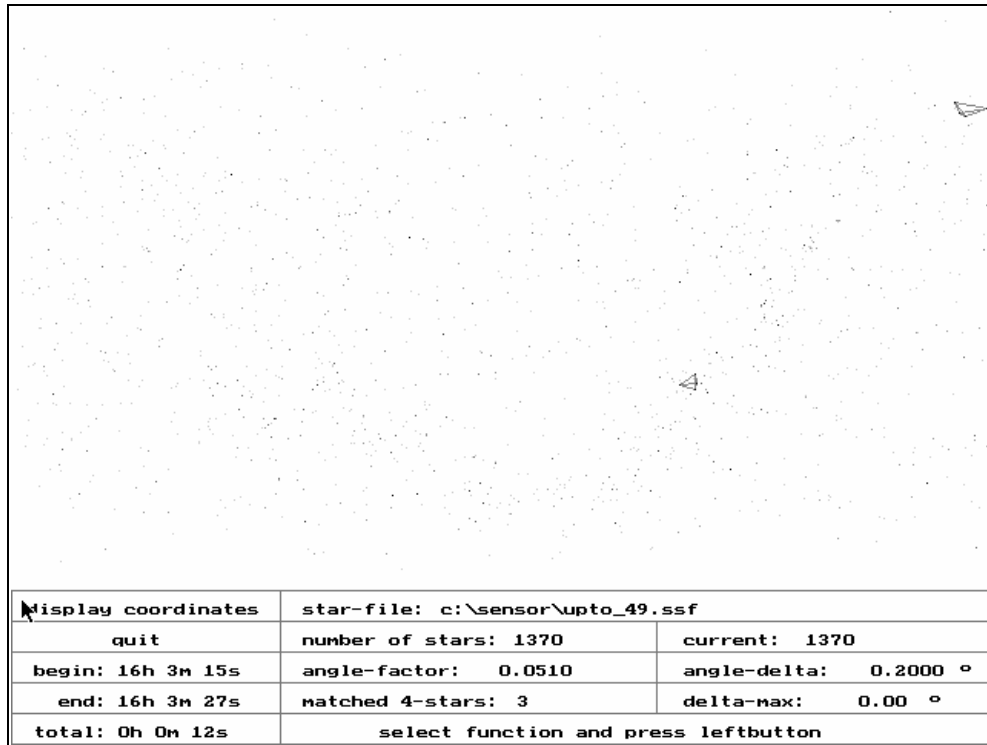


Bild 10: 3 erkannte Sternmuster aus *Cassiopeia* beim 4-Sterne-Matching

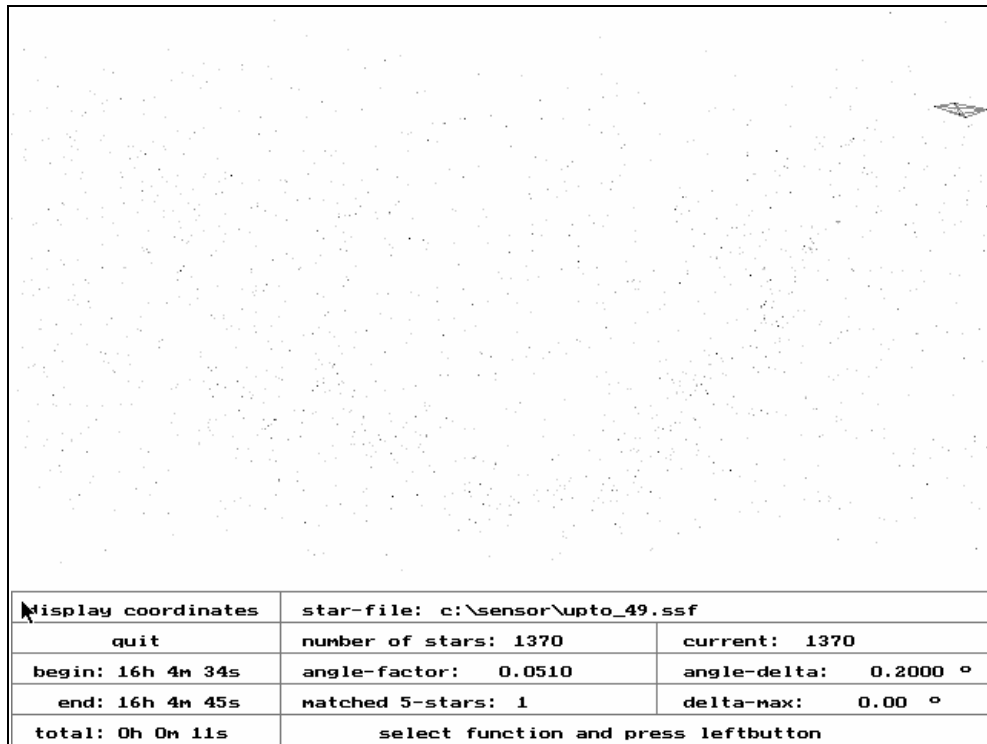


Bild 11:1 erkanntes Sternmuster aus *Cassiopeia* beim 5-Sterne-Matching mit eindeutiger Identifizierung des realen Sternmusters