



## IGEL – Sicherer Kegelscanner für Autonome Fahrzeuge

BMBF-gefördertes Verbundprojekt  
Götting KG, Lehrte · DFKI GmbH, Bremen  
Förderkennzeichen 01IS09044B

# Konzeptpapier Bodenebenenerkennung

### Zusammenfassung

Dieses Dokument enthält das Konzept des IGEL-Projekts für die Software zur Erkennung der Bodenebene auf der Grundlage kontinuierlich, d.h. zyklisch empfangener Messdaten eines oder mehrerer in Fahrtrichtung auf den Boden gerichteter Sicherheitslaserscanner.

<i>Projektbezeichnung</i>	IGEL
<i>Dokument-ID</i>	DOK-K-BE
<i>Verantwortlich</i>	R. Wagner
<i>Erstellt am</i>	20.06.2011
<i>Version</i>	1.11
<i>Bearbeitungszustand</i>	vg. (TÜV)
<i>Revision</i>	839
<i>Letzte Änderung</i>	2011-12-05 11:37:18Z
<i>Dokumentablage</i>	Konzept-Bodenebenenerkennung.tex

## Änderungsliste

- 20.06.11 – *Version:* 0.1 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Initiale Fassung auf Basis des DOK-Konzept-Rampenerkennung 1.0.
- 21.06.11 – *Version:* 0.2 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Einleitung, einige Annahmen und noch fehlende Gliederungspunkte eingefügt.
- 22.06.11 – *Version:* 0.3 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Dieses Dokument beschreibt nur noch das Konzeptpapier zur Bodenebenenenerkennung. Weitere Konzepte werden in separate Konzeptpapiere, die Sicherheitsanforderungen in die Sicherheitsanforderungsspezifikation ausgelagert. Entsprechende inhaltliche Anpassungen.
- 24.06.11 – *Version:* 0.4 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Algorithmenbeschreibung der initialen Schätzung und Verfeinerung überarbeitet. Relevante Formeln aus Thrun u. a. (2004) übernommen.
- 27.06.11 – *Version:* 1.0 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Diverse Abbildungen eingefügt.
- 21.07.11 – *Version:* 1.1 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Koordinatensystem explizit als kartesisch definiert.
- 08.08.11 – *Version:* 1.2 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Maximale und minimale Distanz der Bodenebene zum Ursprung, sowie Skalierungsfaktor als Parameter der initialen Schätzung ergänzt.
- 08.08.11 – *Version:* 1.3 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Umrechnung zwischen Normalenvektor und Zwei-Winkel-Darstellung korrigiert. Expliziter Hinweis auf Singularität eingefügt.
- 10.08.11 – *Version:* 1.4 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Minimale Korrekturen am Beweis. Definition von  $\arctan 2$  in Anhang aufgenommen und auf Auswirkung der abschnittswisen Definition im Beweis hingewiesen.
- 01.09.11 – *Version:* 1.5 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Parameter reorganisiert und vereinfacht. Anmerkung zur Bedeutung der Ebenenprüfung in entsprechendem Abschnitt wiederholt. Test auf Einhaltung der Parametergrenzen hinzugefügt, da diese durch EM-Schritt verlassen werden können.
- 13.09.11 – *Version:* 1.6 – *Bearbeiter:* R. Wagner  
Grafiken zu positiven/negativen Hindernissen zu einer Abbildung zusammengefasst. Einleitung zu 6.2 durch Aufzählung strukturiert. In 6.2.1 Ziel der Umrechnung in “Kippwinkel” erläutert. Einleitung von 6.2.2 ebenfalls besser strukturiert und Herleitung der Formeln zum E-Schritt eingefügt, um Verbindung zu Definitionen herzustellen.

22.09.11 – *Version: 1.7* – *Bearbeiter: R. Wagner*

Sicherheitsanforderungsanalyse eingefügt.

19.10.11 – *Version: 1.8* – *Bearbeiter: R. Wagner*

Datenflussdiagramm als Abb. 5 eingefügt.

09.11.11 – *Version: 1.9* – *Bearbeiter: R. Wagner*

Konfiguration als Gesamtheit der Parameter eingeführt. Weiteren Prüfschritt in 6.2.3 eingefügt und sprachliche Mehrdeutigkeiten in diesem Abschnitt bereinigt.

29.11.11 – *Version: 1.10* – *Bearbeiter: R. Wagner*

Anmerkungen zu Termination der Eigenwertzerlegung bei der Verfeinerung eingefügt.

02.12.11 – *Version: 1.11* – *Bearbeiter: R. Wagner*

Konsistenzprüfung am Ende der Verfeinerung eingefügt.

## Prüfverzeichnis

01.07.11 – Version: 1.0 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg.**

Korrektur gelesen, einige nicht-inhaltliche Änderungen direkt eingepflegt.

10.08.11 – Version: 1.3 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg.**

Korrektur gelesen; Beweis im Anhang hinzugefügt.

11.08.11 – Version: 1.4 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg.**

Korrektur gelesen, minimale Änderungen.

02.09.11 – Version: 1.5 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg.**

Korrektur gelesen, einen Seitenumbruch eingefügt.

17.10.11 – Version: 1.7 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg.**

Sicherheitsanforderungsanalyse Korrektur gelesen, einige sprachliche Änderungen direkt eingepflegt.

25.10.11 – Version: 1.8 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg.**

Keine Änderungen.

05.12.11 – Version: 1.11 – Prüfer: C. Lüth  
Neuer Dokumentenzustand: **vg. (extern)**

Korrektur gelesen, minimale Änderungen, Handzeichnungen ersetzt.

# 1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument ist Kernbestandteil der Dokumente des Projekts IGEL. Hierin werden Spezifikationen von grundlegenden Softwareanforderungen sowie (System- und Umgebungs-) Modelle festgelegt. Alle nicht ausdrücklich als *informativ* gekennzeichneten Abschnitte dieses Dokuments sind als *verbindlich* für alle weiteren, abgeleiteten (bzw. abzuleitenden) Produkte des Projekts anzusehen.

Über das Projekt IGEL hinaus findet dieses Dokument keine Anwendung.

# 2 Verweisungen

Dok.-ID	Dokumentname	Ablagepfad
DOK-K-HE	Konzeptpapier Hinderniserkennung und Staubkornfilter	trunk/Projektdokumente/Konzepte/Konzept-Hinderniserkennung.tex

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Anwendungsbereich</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Verweisungen</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Auszuführende Funktionen</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Grundlegende Annahmen</b>	<b>9</b>
5.1	Annahmen über die Einsatzumgebung . . . . .	9
5.1.1	Bodenmodell . . . . .	9
5.1.2	Positive Hindernisse . . . . .	9
5.1.3	Abgründe und andere negative Hindernisse . . . . .	9
5.1.4	Rampen . . . . .	10
5.1.5	Maskierung von sicherheitsrelevanten Hindernissen . . . . .	10
5.1.6	Fahrt in der Nähe von Wänden oder anderen feststehenden Hindernissen . . . . .	10
5.2	Annahmen über den Sensoraufbau . . . . .	10
5.2.1	Einsatz eines einzelnen Scanners . . . . .	11
5.2.2	Einsatz von zwei Scannern . . . . .	11
5.3	Annahmen über die Sensordaten . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Verfahrensbeschreibung</b>	<b>13</b>
6.1	Datenrepräsentation . . . . .	13
6.1.1	Repräsentation einer Ebene . . . . .	13
6.1.2	Repräsentation der Eingabedaten . . . . .	13
6.1.3	Zu berechnende Ausgabedaten . . . . .	13
6.1.4	Parameter des Algorithmus . . . . .	14
6.2	Erkennen der Bodenebene . . . . .	15
6.2.1	Initiale Schätzung . . . . .	15
6.2.2	Verfeinerung . . . . .	17
6.2.3	Prüfung der Ebenenhypothese . . . . .	19
6.3	Sicherheitsanforderungsanalyse . . . . .	20
6.3.1	Termination . . . . .	20
6.3.2	Korrektheit des Ergebnisses . . . . .	20
6.4	Verhalten im Fehlerfall . . . . .	21
6.4.1	Übergang in Fehlerzustand . . . . .	21
6.4.2	Manueller Reset . . . . .	21
<b>7</b>	<b>Begriffe, Abkürzungen und Symbole</b>	<b>21</b>

7.1	Begriffe . . . . .	21
7.2	Abkürzungen . . . . .	21
<b>A</b>	<b>Definitionen</b>	<b>22</b>
<b>B</b>	<b>Beweise</b>	<b>22</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>23</b>

### 3 Einleitung

Derzeitiger Stand der Technik bei der Absicherung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) vor Kollisionen sind i.d.R. berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen in Form von Sicherheitlaserscannern (z.B. ROTOSCAN RS4 von Leuze electronic oder S3000 von SICK), die in Fahrtrichtung eine Ebene parallel zum Boden in 15cm Höhe nach möglichen Hindernissen abtasten. Wird dabei ein Mindestabstand unterschritten, so wird ein Nothalt des Fahrzeugs (im folgenden allgemein EUC – Equipment under Control) ausgelöst.

Dies hat drei entscheidende Nachteile. Erstens können im folgenden als *negative Hindernisse* bezeichnete Hindernisse, die sich als Löcher im Boden oder Abgründe beschreiben lassen, von einem derartigen Scanneranbau nicht detektiert werden. Zweitens darf sich das EUC bei Lastwechsel (o.ä.) nur minimal neigen, da die Scanebene sonst in den Boden "eintauchen" und der Boden als Hindernis gewertet werden würde. Damit ist auch eine aufsteigende Rampenfahrt nicht möglich, da die Rampe als Hindernis verkannt werden würde. Drittens müssen die Hindernisse ihre maximale Ausdehnung auf der Scannerebene haben. Das Unterfahren von Tischen wird damit beispielsweise ebensowenig ausgeschlossen wie Kollisionen mit anderen vorragenden Hindernissen.

Hier setzt das in diesem Dokument beschriebene Konzept an. Ein oder mehrere Sicherheitlaserscanner werden zusätzlich in ein bis zwei Metern Höhe am EUC mit Scanrichtung auf den Boden in Fahrtrichtung vor dem Fahrzeug montiert (vgl. Abschnitt 5.2). Diese werden im folgenden kollektiv als *Bodenscanner* bezeichnet. Der Bodenscanner misst im Normalfall nur Distanzwerte, die auf das Auftreffen des ausgesandten Laserlichts auf den Boden zurückgeht. Kleinere Distanzen ergeben sich bei positiven Hindernissen, größere Distanzen bei negativen Hindernissen.

Die zentrale in diesem Dokument beschriebene Softwarefunktionalität ist daher das sichere Erkennen der Bodenebene aus den Messdaten des Bodenscanners. In nachgelagerten, in diesem Dokument nicht beschriebenen Verarbeitungsschritten kann dann eine Hinderniserkennung durch Vergleich gemessener mit aus der Ebenenhypothese berechneter, erwarteter Distanzwerte realisiert werden.

Die Überwachung durch den Bodenscanner ist dabei nicht als Ersatz existierender Schutzeinrichtungen, sondern als Ergänzung zu sehen. So ist eine Integration beispielsweise mit Schaltleisten zum Wiederanlauf denkbar.

### 4 Auszuführende Funktionen

Das in diesem Dokument beschriebene Konzept wird in einer größeren Softwarekomponente verwendet, die als Ganzes folgende Funktionen ausführen soll:

1. Erkennung der vom EUC befahrenen Bodenebene anhand von Messdaten eines oder mehrerer in Richtung Boden gerichteter Laserscanner
2. Erkennung von positiven (auf der Bodenebene) und negativen Hindernissen ("Löcher" im Boden) als Abweichung von der erkannten Bodenebene zur Vermeidung von Kollisionen oder Stürzen des EUC
3. Ausgabe von Signalen: Normal, Stopp auf Basis erkannter Bodenebene bzw. Hindernisse

Im folgenden wird nur die Teilkomponente zur Umsetzung des ersten Punkts, der Erkennung der Bodenebene, betrachtet. Weitere Teilkomponenten sind nicht Gegenstand dieses Konzeptpapiers, son-



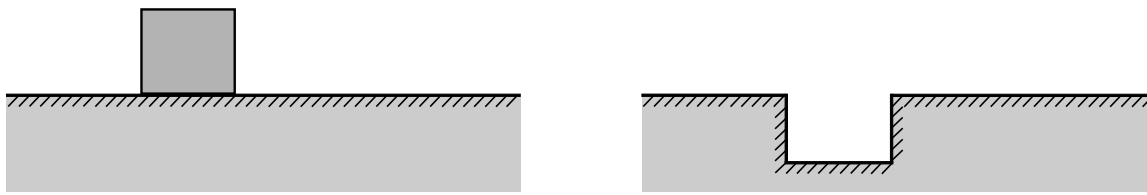


Abbildung 1: **Links:** Ein positives Hindernis auf ansonsten ebenem Boden. **Rechts:** Ein negatives Hindernis in ansonsten ebenem Boden.

dem werden in separaten Dokumenten beschrieben (vgl. Abschnitt 2). Die Schnittstelle zu diesen weiteren Teilkomponenten stellt die erkannte Ebene dar.

## 5 Grundlegende Annahmen

### 5.1 Annahmen über die Einsatzumgebung

#### 5.1.1 Bodenmodell

Der befahrbare Boden ist grundsätzlich glatt und entspricht mathematisch/geometrisch einer Ebene. Sowohl leichte baulich bedingte Unebenheiten als auch eine leichte Krümmung des Bodens sind zulässig. Dies wird dadurch realisiert, dass in begrenztem Rahmen, wie in der Verfahrensbeschreibung (Abschnitt 6) erläutert, Abweichungen von der idealen Ebene erlaubt werden.

Alle Bodenoberflächen im Einsatzbereich des EUC müssen insbesondere bzgl. ihrer Remissionseigenschaften die Anforderungen des Laserscannerherstellers erfüllen, so dass sichere Distanzwerte geliefert werden.

#### 5.1.2 Positive Hindernisse

Positive Hindernisse treten aus Sicht des Bodenscanners aus dem Boden hervor (Abb. 1 links). Dies beinhaltet Gegenstände, die primär für die Verfügbarkeit relevant sind, und sicherheitsrelevante Hindernisse wie Personen.

Alle Oberflächen von möglichen positiven Hindernissen im Einsatzbereich des EUC müssen insbesondere bzgl. ihrer Remissionseigenschaften die Anforderungen des Laserscannerherstellers erfüllen, so dass sichere Distanzwerte geliefert werden. Dies gilt insbesondere für die Kleidung von Personen.

#### 5.1.3 Abgründe und andere negative Hindernisse

Negative Hindernisse erlauben ein Eindringen des EUC in die Bodenebene (Abb. 1 rechts). Dies können Löcher im Boden, wie etwa bei nicht abgedeckten Kanalschächten, oder Abgründe, wie beispielsweise vor einer Montagegrube sein.

Bei in der Einsatzumgebung vorkommenden negativen Hindernissen muss sichergestellt sein, dass das Zusammenspiel mit Objektflächen, wie z.B. retroreflektiver Folie, nicht dazu führt, dass vom Laserscanner Distanzwerte geliefert werden, die dem ebenen Boden entsprechen. Typischerweise haben die Remissionseigenschaften von Oberflächenmaterialien einen Einfluss von nur wenigen Zenti-

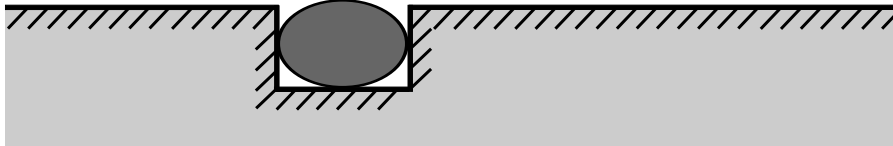


Abbildung 2: Ein maskiertes sicherheitsrelevantes Hindernis in einem negativen Hindernis. Bei zu geringem Höhenunterschied ist das maskierte Hindernis nicht mehr detektierbar.

metern, sodass nur sehr kleine negative Hindernisse ein Problem darstellen könnten. Für die Laserscannerspezifischen Werte sei auf die Dokumentation des Herstellers verwiesen.

Es werden darüber hinaus keine Annahmen über die Remissionseigenschaften (wie etwa Mindestremission, o.ä.) von Materialien innerhalb von negativen Hindernissen getroffen.

#### 5.1.4 Rampen

Es wird im Rahmen dieses Konzeptpapiers davon ausgegangen, dass im Arbeitsbereich des EUC keine Rampen vorkommen.

#### 5.1.5 Maskierung von sicherheitsrelevanten Hindernissen

Es ist durch entsprechende bauliche Schutzmaßnahmen und/oder Arbeitsschutzanweisungen dafür Sorge zu tragen, dass die Kombinationen aus einem negativen Hindernis und einem sicherheitsrelevanten Hindernis, beispielsweise eine liegende Person in einem nicht abgedeckten Abflussgraben, nicht wieder eine der Bodenebene entsprechende Oberfläche ergibt. Dies kann unter Umständen nicht aus den Messpunkten des Bodenscanners erkannt werden (Abb. 2).

#### 5.1.6 Fahrt in der Nähe von Wänden oder anderen feststehenden Hindernissen

Wände und andere feststehende Hindernisse sind positive Hindernisse im oben genannten Sinne und werden bei der Ebenenerkennung als eben solche Hindernisse behandelt. Ein Ausblenden bestimmter Bereiche bei der Erkennung aufgrund eines entsprechenden Eingangssignals ist theoretisch möglich, jedoch derzeit nicht vorgesehen.

### 5.2 Annahmen über den Sensoraufbau

Das in diesem Dokument beschriebene Verfahren ist weitgehend unabhängig vom verwendeten Laserscanner, sofern eine gewisse Scangeometrie eingehalten wird. Im folgenden wird jedoch von zwei konkreten Sensoraufbauten ausgegangen.

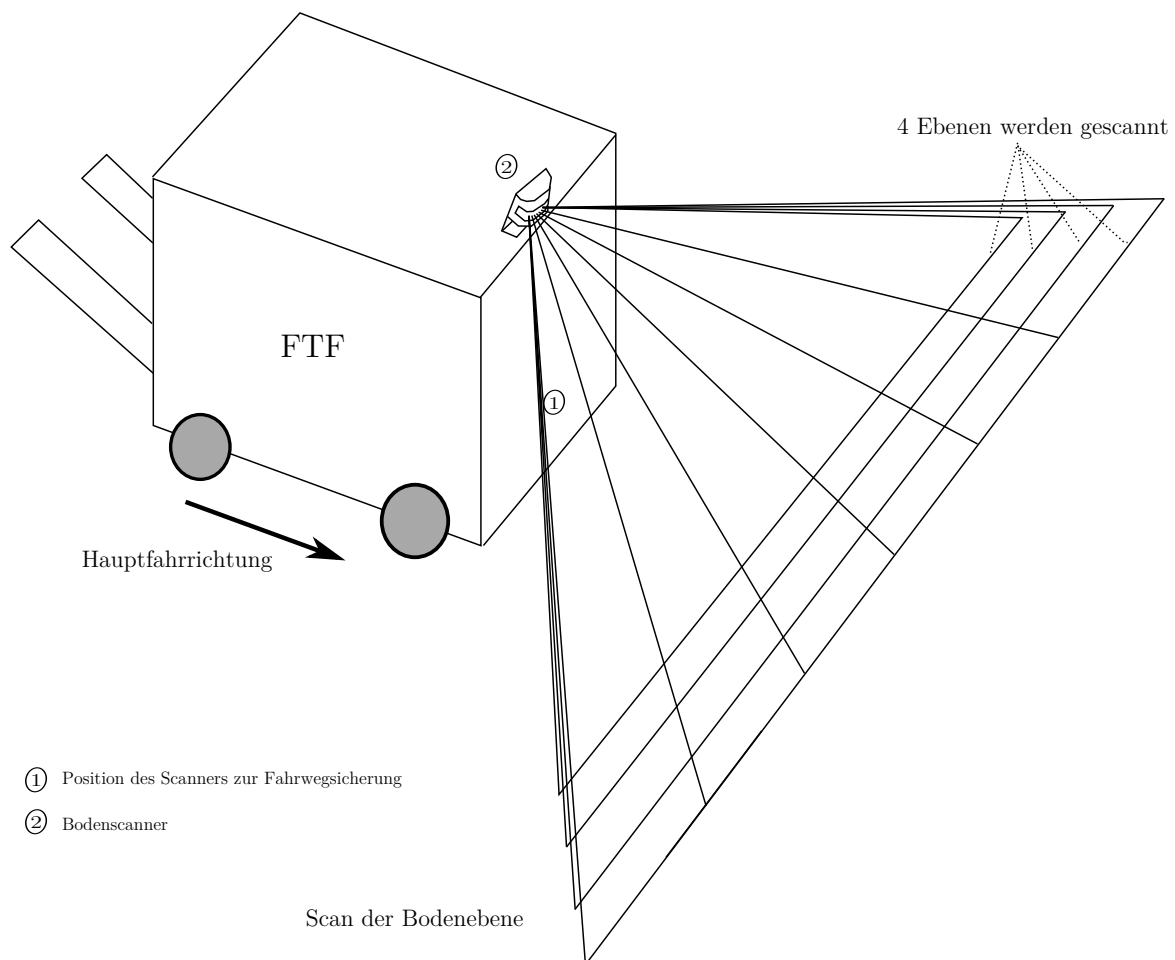


Abbildung 3: Ein Mehrebenenscanner als Bodenscanner an einem FTF.

### 5.2.1 Einsatz eines einzelnen Scanners

Dieser Sensoraufbau geht von einem einzelnen Scanner aus, der anstatt einer einzigen Ebene wie bei einem klassischen Sicherheitslaserscanner vier Ebenen gleichzeitig scannt. Die Winkel zwischen den Ebenen müssen hinreichend groß sein, damit die Bodenebene durch die aus dem Schnitt mit der Bodenebene resultierenden Messpunkte wohlbestimmt ist.

Der Scanner ist so am EUC schräg nach vorne geneigt anzubringen (Abb. 3), dass die vier Scanebenen den Boden senkrecht zur Hauptfahrtrichtung schneiden, und dass die vorderste Schnittgerade so weit vom EUC entfernt ist, dass bei maximaler Geschwindigkeit des EUC und Detektion eines Hindernisses in der vordersten Scanebene ein sicherer Nothalt gewährleistet ist.

### 5.2.2 Einsatz von zwei Scannern

In diesem Sensoraufbau werden zwei klassische Sicherheitslaserscanner in einer schneepflugartigen Anordnung zu einem Bodenscanner kombiniert (Abb. 4). Beide Scanebenen sind so schräg nach vorne geneigt, dass die Schnittgeraden mit der Bodenebene zwei Seiten eines Dreiecks ergeben. Die Spitze der beiden Dreiecksseiten zeigt dabei in Hauptfahrtrichtung. Die "Voraussicht" muss wieder hinreichend groß für einen sicheren Nothalt sein.

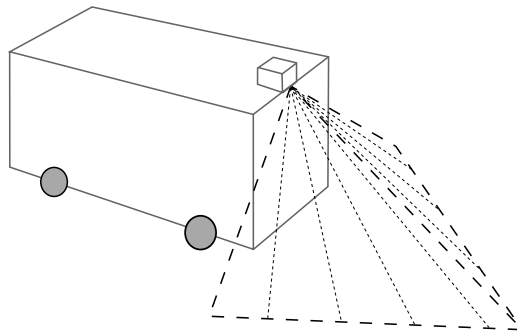


Abbildung 4: Zwei Sicherheitslaserscanner als Bodenscanner an einem FTF.

### 5.3 Annahmen über die Sensordaten

Es wird davon ausgegangen, dass die Messwerte des Bodenscanners zuverlässig sind, d.h. dass alle eingesetzten Scanner als Sicherheitslaserscanner zugelassen sind.

## 6 Verfahrensbeschreibung

In diesem Abschnitt wird das *Lösungskonzept* der softwarebezogenen Aufgabenstellung zur Bodenebenenenerkennung erläutert.

### 6.1 Datenrepräsentation

#### 6.1.1 Repräsentation einer Ebene

Es gibt mehrere Möglichkeiten, eine Ebene mathematisch zu beschreiben. In diesem Dokument wird die Darstellung durch Normalenvektor  $n$  und Distanz  $d$  zur Ebene durch den Nullpunkt gewählt. Die Ebene ist dann definiert als Menge aller Punkte  $p_i$ , für die mit  $\|n\| = 1$  gilt:

$$n \cdot p_i - d = 0, \quad (1)$$

Es sei angemerkt, dass es in dieser Darstellung zwei Repräsentationen für die gleiche Ebene gibt, nämlich  $(n, d)^T$  und  $(-n, -d)^T$ , was anschaulich der Spiegelung des Normalenvektors an der Ebene und dem Vorzeichenwechsel der Distanz entspricht.

#### 6.1.2 Repräsentation der Eingabedaten

Die Eingabedaten für die Bodenebenenenerkennung sind die vom Bodenscanner ermittelten Auftreffpunkte der einzelnen Laserstrahlen. Um die Bodenebenenenerkennung unabhängig von konkreten Datenrepräsentationen bestimmter Hersteller zu halten und die Kombination mehrerer Laserscanner zu einem Bodenscanner zu erlauben, erwartet die Softwarekomponente diese als Liste von 3D-Punkten in metrischen Bodenscannerkoordinaten zu erhalten.

<i>Bezeichnung</i>	<i>Erläuterung</i>
$N$	Anzahl der im Scan enthaltenen Punkte
$P_i = (x_i, y_i, z_i)$	Im Scan enthaltene Punkte, für $i = 1, \dots, N$

Das Bodenscannerkoordinatensystem ist ein rechtshändisches, metrisches, kartesisches Koordinatensystem, dessen x-Achse in Hauptfahrtrichtung des EUC und dessen z-Achse senkrecht nach oben zeigt. Es hat seinen Ursprung am Montagepunkt des Bodenscanners und ist fest mit dem EUC verbunden, macht also dessen Bewegungen mit.

Es sei angemerkt, dass für die in diesem Dokument beschriebene Erkennung der Bodenebene nur Punkte berücksichtigt werden, die gültige Messungen darstellen und auf Remission basieren (d.h. der entsprechende Laserstrahl ist auf ein Objekt in Reichweite getroffen und das zurückgeworfene Signal wurde erfolgreich vom Scanner empfangen und ausgewertet).

#### 6.1.3 Zu berechnende Ausgabedaten

Die Ausgabe der Bodenebenenenerkennung ist die erkannte Bodenebene  $\theta = (n, d)^T$  oder ein Fehlercode.

<i>Bezeichnung</i>	<i>Erläuterung</i>
$n = (x, y, z)$	Normalenvektor der Bodenebene
$d$	Distanz der Bodenebene

#### 6.1.4 Parameter des Algorithmus

Folgende Parameter bilden die *Konfiguration* des Algorithmus.

Globale Parameter:

<i>Parameter</i>	<i>Erläuterung</i>
$\alpha_{min}$	Suchraum für Winkel $\alpha$
$\alpha_{max}$	
$\beta_{min}$	Suchraum für Winkel $\beta$
$\beta_{max}$	
$d_{min}$	minimales $d$
$d_{max}$	maximales $d$

Parameter zur Bestimmung der initialen Ebenenschätzung:

<i>Parameter</i>	<i>Erläuterung</i>
$\alpha_{increment}$	Schrittweite für Winkel $\alpha$
$\beta_{increment}$	Schrittweite für Winkel $\beta$
$\delta$	maximal zulässige Distanz dafür, dass ein Punkt zur Bodenebene gehört
$s$	skaliert die Histogrammintervallbreite in Abhängigkeit von $\delta$ (siehe 6.2.1)

Parameter zur Verfeinerung:

<i>Parameter</i>	<i>Erläuterung</i>
$\sigma$	Standardabweichung des Messrauschens einzelner Messpunkte
$z_{max}$	maximale Reichweite des Bodenscanners [m]
$K$	Anzahl Iterationen der Verfeinerung
$M$	maximale Anzahl QR-Schritte bei der Eigenwertzerlegung in einer Verfeinerungsiteration; sollte so gewählt werden, dass damit Maschinengenauigkeit erreicht wird (siehe 6.2.2)

Parameter zur Ebenenprüfung:

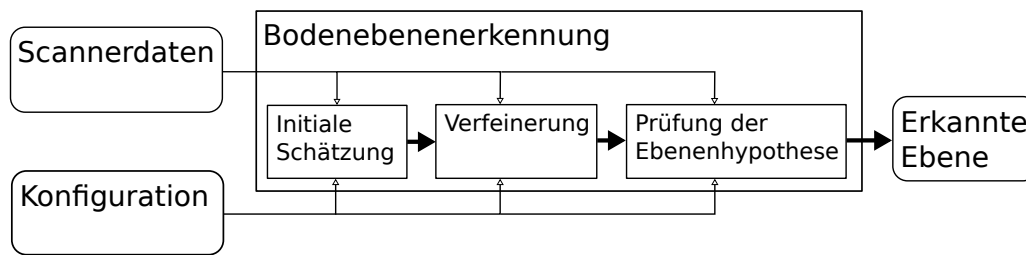


Abbildung 5: Datenfluss der Bodenebenenerkennung. Alle Teilkomponenten arbeiten mit den Messdaten vom Bodenscanner, der Konfiguration und ggf. mit dem Berechnungsergebnis vorheriger Komponenten.

Parameter	Erläuterung
$\rho$	Anteil der Punkte, die den Distanztest bestehen müssen, damit die Ebene gültig ist

## 6.2 Erkennen der Bodenebene

Das Erkennen der Bodenebene erfolgt, wie auch in Abb. 5 dargestellt, in drei aufeinanderfolgenden Schritten.

1. **Initiale Schätzung:** Ein Raster zulässiger Winkel und Distanzen wird nach der Ebene durchsucht, zu der die meisten Punkte passen. Dies dient als initiale Schätzung der Bodenebene. Durch die Diskretisierung des Suchrasters ist die Schätzung jedoch nur (näherungsweise) bis auf die Schrittweite des Rasters genau.
2. **Verfeinerung:** Diese initiale Schätzung wird durch Anwendung des EM-Algorithmus verfeinert. Dieses Verfahren kommt ohne Diskretisierung aus, benötigt jedoch eine gute initiale Schätzung als Startwert, um die wahrscheinlichste Ebenenschätzung aus den Sensordaten zu ermitteln.
3. **Prüfung der Ebenenhypothese:** Die berechnete Ebenenschätzung wird darauf geprüft, ob sie angesichts der gemessenen Sensordaten plausibel ist.

Wie in 6.3 erläutert wird, ist die abschließende *Prüfung der Ebenenhypothese* der für die *Sicherheitsfunktionalität* entscheidende Schritt, da sich hier entscheidet, unter welchen Bedingungen eine Ebenenschätzung tatsächlich als erkannte Ebene zurückgegeben und ggf. durch weitere Teilkomponenten z.B. zur Hinderniserkennung verwendet wird<sup>1</sup>.

### 6.2.1 Initiale Schätzung

Es gilt, eine initiale Schätzung der Bodenebene, welche aus Normalenvektor und Distanz zum Ursprung besteht, zu bestimmen. Dazu wird systematisch der gesamte erlaubte Bereich möglicher Bodenebenen nach der Ebene durchsucht, die am besten zu den Sensordaten passt.

<sup>1</sup>Letzteres ist nicht Teil dieses Konzeptpapiers.

Um die bei der Suche zu berücksichtigenden Möglichkeiten zu reduzieren, wird zunächst die Tatsache ausgenutzt, dass der Normalenvektor zwar drei Parameter hat, jedoch auch ein Einheitsvektor sein muss. Der Normalenvektor hat somit nur zwei Freiheitsgrade, die als zwei "Kippwinkel"  $\alpha$  und  $\beta$  repräsentiert werden können (wobei diese Darstellung singularitätenbehaftet ist). Die Umrechnung eines Normalenvektor  $n = (x, y, z)^T$  in die "Kippwinkel" der Ebene geschieht wie folgt:

$$\alpha(n) = \arcsin(x) \quad (2)$$

$$\beta(n) = \arctan2(y, z). \quad (3)$$

Umgekehrt gelingt die Rücktransformation folgendermaßen:

$$n(\alpha, \beta) = (x, y, z)^T \quad (4)$$

$$x = \sin(\alpha) \quad (5)$$

$$y = \cos(\alpha) \sin(\beta) \quad (6)$$

$$z = \cos(\alpha) \cos(\beta). \quad (7)$$

Die Transformationen sind invers (siehe Anhang B).  $\arctan2$  ist eine Variante des Arkustangens mit zwei Argumenten (siehe Anhang A).

Mit dieser Umrechnung ist bzgl. der Orientierung der Bodenebene nur noch ein zweidimensionaler Suchraum abzudecken. Die Singularität der gewählten Darstellung liegt bei  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ . Es ist, z.B. durch geeignete Wahl des Koordinatensystems, dafür Sorge zu tragen, dass der Winkel der Bodenebene nicht in diesem Bereich liegt.

Die eigentliche Bestimmung der initialen Schätzung der Bodenebene geschieht dann wie folgt:

1. Betrachte im erlaubten Winkelbereich, der sich aus der erlaubten Neigung des EUC gegenüber dem Boden ergibt, in gleichen Winkelschritten alle Kombinationen aus  $\alpha$  und  $\beta$  mit

$$\alpha \in \{\alpha_{min} + k\alpha_{increment} \mid k \in \mathbb{N}_0 \wedge \alpha_{min} + k\alpha_{increment} \leq \alpha_{max}\} \quad (8)$$

und

$$\beta \in \{\beta_{min} + k\beta_{increment} \mid k \in \mathbb{N}_0 \wedge \beta_{min} + k\beta_{increment} \leq \beta_{max}\}. \quad (9)$$

Berechne dabei für jede Kombination  $(\alpha, \beta)$  die vorzeichenbehaftete Distanz von jedem Scanpunkt  $P_i$  zur Ebene durch den Nullpunkt.

$$D(\alpha, \beta, P_i) = n(\alpha, \beta) \cdot P_i \quad (10)$$

2. Erstelle aus allen Distanzwerten für eine Winkelkombination ein Histogramm im Bereich von  $d_{min}$  bis  $d_{max}$ . Die dabei verwendete Intervallbreite ergibt sich aus dem Distanzschwellwert  $\delta$  für die Zugehörigkeit eines Punktes zu einer Ebene. Um Diskretisierungsartefakte zu vermindern, wird als Intervall jedoch nicht der doppelte Distanzschwellwert verwendet. Stattdessen wird zunächst mit Intervallen der Breite  $\frac{\delta}{s}$  gearbeitet.
3. Suche dann in allen Histogrammen nach den  $2 \cdot s$  nebeneinanderliegenden Intervallen, die zusammen die meisten Punkte enthalten.
4. Die Mitte dieses Blocks aus  $2 \cdot s$  Intervallen ergibt das  $d_0$  der initialen Schätzung (jeder im Block enthaltene Punkt hat dazu eine Distanz von maximal  $\delta$ ), ihr Normalenvektor  $n_0$  ist der zu der Winkelkombination des Histogramms passende.



### 6.2.2 Verfeinerung

Die im folgenden vorgestellte Variante des Expectation Maximization (EM) Algorithmus ist weitgehend übernommen aus Thrun u. a. (2004). Die Grundidee dabei ist, dass zum Bestimmen der wahrscheinlichsten Ebenenschätzung zwei Fragen (gleichzeitig) beantwortet werden müssen:

- Welche Messpunkte gehören zur Ebene?
- Und welche Ebene ist es?

Der EM-Algorithmus ist ein iteratives probabilistisches Verfahren, das sich durch abwechselndes Behandeln beider Fragen einer besseren Schätzung annähert – jeweils unter der Annahme, dass eine näherungsweise Antwort aus der vorherigen Iteration schon bekannt ist. Dazu ist ein Startwert nötig – die initiale Schätzung der Ebene, die im vorigen Abschnitt bestimmt wurde.

Der Algorithmus ist allgemein formuliert für die Schätzung von  $J$  Ebenen  $\theta_j$  ( $j = 1 \dots, J$ ). Im Kontext dieses Dokuments ist  $J = 1$ . Die euklidische Distanz eines Punktes  $P_i$  zu Ebene  $\theta_j = (n_j, d_j)^T$  wird bezeichnet als

$$d(P_i, \theta_j) = |n_j \cdot P_i - d_j| \quad (11)$$

Ob ein Punkt  $P_i$  zu einer Ebene  $\theta_j$  gehört, ist in seiner Korrespondenzvariable  $0 \leq c_{ij} \leq 1$  kodiert. Die spezielle Korrespondenzvariable  $0 \leq c_{i*} \leq 1$  gibt an, ob ein Punkt  $P_i$  keiner Ebene zugeordnet werden kann. Ein Punkt kann tatsächlich nur zu genau einer oder keiner Ebene gehören, es gilt also:

$$c_{i*} + \sum_{j=1}^J c_{ij} = 1 \quad (12)$$

Im folgenden wird mit Wahrscheinlichkeiten über diese Korrespondenzvariablen gearbeitet.

Als Messmodell wird angenommen, dass für einen Punkt, der zu einer bestimmten Ebene gehört, seine Distanz zur Ebene einer Normalverteilung mit Mittelwert 0 und Standardabweichung  $\sigma$  folgt, d.h., dass gilt

$$p(P_i | c_{ij} = 1, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2} \frac{d^2(P_i, \theta_j)}{\sigma^2}}. \quad (13)$$

Dafür, dass ein Messpunkt zu keiner Ebene gehört, wird eine Gleichverteilung innerhalb der Reichweite  $z_{max}$  des Sensors angenommen, d.h.,

$$p(P_i | c_{i*} = 1, \theta) = \begin{cases} \frac{1}{z_{max}} & \text{falls } 0 \leq \|P_i\| \leq z_{max} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (14)$$

Der eigentliche Algorithmus verwendet die initiale Schätzung  $\theta_0 = (n_0, d_0)^T$  als Startwert. Dann werden abwechselnd zwei Schritte, der E-Schritt und der M-Schritt, ausgeführt:

- Der E-Schritt bestimmt für jeden Messpunkte die Wahrscheinlichkeit, dass dieser zu einer oder keiner Ebene gehört (Korrespondenz).

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Punkt zu einer Ebene gehört ist, wie Thrun u. a. (2004) aus obigen Annahmen herleiten, abhängig von seiner Distanz:

$$\begin{aligned}
 e_{ij}^{[t]} &:= p(c_{ij}|\theta^{[t]}, P_i) \\
 &= \frac{p(P_i|\theta^{[t]}, c_{ij})p(c_{ij}|\theta^{[t]})}{p(P_i|\theta^{[t]})} \\
 &= \frac{p(P_i|\theta^{[t]}, c_{ij})p(c_{ij}|\theta^{[t]})}{p(P_i, c_{i*}|\theta^{[t]}) + \sum_k p(P_i, c_{ik}|\theta^{[t]})} \\
 &= \frac{p(P_i|\theta^{[t]}, c_{ij})p(c_{ij}|\theta^{[t]})}{p(P_i|c_{i*}, \theta^{[t]})p(c_{i*}|\theta^{[t]}) + \sum_k p(P_i|c_{ik}, \theta^{[t]})p(c_{ik}|\theta^{[t]})} \\
 &= \frac{p(P_i|\theta^{[t]}, c_{ij})}{p(P_i|c_{i*}, \theta^{[t]}) + \sum_k p(P_i|c_{ik}, \theta^{[t]})} \\
 &= \frac{e^{-\frac{1}{2} \frac{d^2(P_i, \theta_j^{[t]})}{\sigma^2}}}{e^{-\frac{1}{2} \log \frac{z_{max}}{2\pi\sigma^2}} + \sum_k e^{-\frac{1}{2} \frac{d^2(P_i, \theta_j^{[t]})}{\sigma^2}}} \tag{15}
 \end{aligned}$$

Analog dazu gilt für die Wahrscheinlichkeit, zu keiner Ebene zu gehören:

$$\begin{aligned}
 e_{i*}^{[t]} &:= p(c_{i*}|\theta^{[t]}, P_i) \\
 &= \frac{p(P_i|\theta^{[t]}, c_{i*})}{p(P_i|c_{i*}, \theta^{[t]}) + \sum_k p(P_i|c_{ik}, \theta^{[t]})} \\
 &= \frac{e^{-\frac{1}{2} \log \frac{z_{max}}{2\pi\sigma^2}}}{e^{-\frac{1}{2} \log \frac{z_{max}}{2\pi\sigma^2}} + \sum_k e^{-\frac{1}{2} \frac{d^2(P_i, \theta_j^{[t]})}{\sigma^2}}} \tag{16}
 \end{aligned}$$

Das Superskript <sup>[t]</sup> bezeichnet dabei jeweils den Wert bei Iteration *t*.

- Der M-Schritt berechnet die wahrscheinlichste Ebene unter Einbeziehung der Korrespondenzen als Lösung des Minimierungsproblems

$$\sum_i \sum_j e_{ij}^{[t]} (n_j^{[t+1]} \cdot P_i - d_j^{[t+1]}) = \min!, \tag{17}$$

wobei die Parameter  $n_j^{[t+1]}$  und  $d_j^{[t+1]}$  unter Einhaltung der Nebenbedingung  $\|n_j^{[t+1]}\| = 1$  zu bestimmen sind.

Wie Thrun u. a. (2004) herleiten, ergibt sich daraus ein Eigenwertproblem der Form

$$A_j^{[t]} n_j^{[t+1]} = \lambda_j n_j^{[t+1]}, \tag{18}$$

wobei jedes der  $A_j^{[t]}$  eine  $3 \times 3$  Matrix ist mit

$$(A_j^{[t]})_{lm} = \sum_i e_{ij}^{[t]} P_{il} P_{im} - \frac{\sum_i e_{ij}^{[t]} P_{im} \sum_k e_{kj}^{[t]} P_{km}}{\sum_k e_{kj}^{[t]}}. \tag{19}$$

Die Lösung des Gleichungssystems ergibt sich durch Eigenwertzerlegung von  $A_j^{[t]}$ . Der Eigenvektor zum kleinsten Eigenwert ist der gesuchte neue Normalenvektor  $n_j^{[t+1]}$ . Die Eigenwertzerlegung kann mittels symmetrischem QR-Algorithmus umgesetzt werden (Golub u. Van Loan, 1996, Algorithm 8.3.1). Der Algorithmus terminiert normalerweise, sobald mit Erreichen der Maschinengenauigkeit Konvergenz erzielt worden ist. Dies muss so modifiziert werden, dass spätestens nach  $M$  QR-Schritten abgebrochen wird, falls keine Konvergenz erzielt werden konnte. In diesem Fall gibt die Verfeinerung einen Fehlercode zurück.

Die Distanz  $d_j^{[t+1]}$  der Ebene  $\theta_j^{[t+1]}$  kann direkt berechnet werden als

$$d_j^{[t+1]} = \frac{\sum_k e_{kj}^{[t]} n_j^{[t+1]} \cdot P_k}{\sum_k e_{kj}^{[t]}} \quad (20)$$

Es werden  $K$  EM-Iterationen durchgeführt. Um sicherzustellen, dass es sich tatsächlich um eine Verfeinerung der initialen Schätzung handelt, wird dann die Ebene  $\theta_1^{[K]}$  darauf geprüft, ob sie im Bereich von durch Diskretisierungsartefakte erklärbarer Schwankungen liegt, d.h., ob

$$\left| \alpha(n_0) - \alpha(n_1^{[K]}) \right| \leq 1,5 \alpha_{increment} \quad (21)$$

$$\left| \beta(n_0) - \beta(n_1^{[K]}) \right| \leq 1,5 \beta_{increment} \quad (22)$$

$$\left| d_0 - d_1^{[K]} \right| \leq 1,5 \frac{\delta}{s} \quad (23)$$

Ist dies der Fall, so ist die Ebenenschätzung  $\hat{\theta} := \theta_1^{[K]}$  das Ergebnis des Verfeinerungsschritts der Bodenebenenerkennung. Ansonsten wird ein Fehlercode zurückgegeben.

### 6.2.3 Prüfung der Ebenenhypothese

Wie oben schon angemerkt und in 6.3 genauer erläutert wird, ist die Prüfung der Ebenenhypothese der für die Sicherheitsfunktionalität entscheidende, abschließende Schritt der Ebenenerkennung, da sich hier unabhängig von der vorgelagerten Erkennung entscheidet, unter welchen Bedingungen eine Ebenenschätzung tatsächlich als erkannte Ebene zurückgegeben und ggf. durch weitere Teilkomponenten zur Hinderniserkennung verwendet wird.

Eingabe für die Prüfung der Ebenenhypothese ist neben der Konfiguration und den Messwerten des Bodenscanners insbesondere die geschätzte Ebene  $\hat{\theta} = (\hat{n}, \hat{d})^T$ . Da die weiteren Schritte dies voraussetzen, wird zunächst geprüft, ob  $\hat{n}$  tatsächlich ein Einheitsvektor ist, d.h., ob

$$\|\hat{n}\| = 1. \quad (24)$$

Weiter ist zu prüfen, ob die geschätzte Ebene  $\hat{\theta} = (\hat{n}, \hat{d})^T$  im erlaubten Winkel und Distanzbereich liegt, d.h., ob folgendes gilt:

$$\alpha_{min} \leq \alpha(\hat{n}) \leq \alpha_{max} \quad (25)$$

$$\beta_{min} \leq \beta(\hat{n}) \leq \beta_{max} \quad (26)$$

$$d_{min} \leq \hat{d} \leq d_{max} \quad (27)$$

Um sicherzustellen, dass die geschätzte Ebene konsistent mit den Messwerten des Bodenscanners ist, wird weiterhin geprüft, ob mindestens eine Anzahl von  $\rho N$  Punkten maximal  $\delta$  von der geschätzten Ebene entfernt sind, d.h., ob

$$\#\{P_i \mid |\hat{n} \cdot P_i - \hat{d}| \leq \delta\} \geq \rho N. \quad (28)$$

Nur wenn alle Einzelbedingungen erfüllt sind, wird  $\hat{\theta}$  schließlich als erkannte Bodenebene akzeptiert, ansonsten wird die geschätzte Ebene verworfen und ein Fehlercode zurückgegeben.

### 6.3 Sicherheitsanforderungsanalyse

Nicht alle Schritte des oben beschriebenen Verfahrens sind sicherheitsgerichtet. Für das Erbringen der Sicherheitsfunktionalität müssen folgende Anforderungen gewährleistet sein:

- alle Schritte müssen in fest nach oben begrenzter Zeit terminieren,
- und das Ergebnis der Bodenebenenenerkennung muss entweder mit der tatsächlichen Bodenebene übereinstimmen oder ein Fehlercode sein.

#### 6.3.1 Termination

- Die **initiale Schätzung** durchläuft den erlaubten Winkel- und Distanzbereich in einer festen Anzahl Schritte und führt jeweils eine feste Anzahl Operationen pro im Scan enthaltenem Punkt durch. Die Anzahl der betrachteten Punkte ist durch die Scannerhardware fest begrenzt.
- Bei der **Verfeinerung** werden  $K$  Iterationen des EM-Verfahrens ausgeführt. Die dabei ausgeführten Durchläufe von inneren Schleifen sind durch die Anzahl der Punkte und die Anzahl der Ebenen begrenzt. Die in jeder EM-Iteration zu berechnende Eigenwertzerlegung erfolgt iterativ, bricht jedoch nach maximal  $M$  Iterationen ab.
- Die **Prüfung der Ebenenhypothese** durchläuft einmal alle Punkte.

Insgesamt sind also alle Iterationen des Algorithmus fest nach oben begrenzt, und damit die Termination sichergestellt.

#### 6.3.2 Korrektheit des Ergebnisses

Die Ergebnisse der initialen Schätzung und der Verfeinerung werden nicht direkt zurückgegeben, sondern erst an die abschließende Prüfung der Ebenenhypothese übergeben. Bei dieser Prüfung wird die Ebenenhypothese noch einmal unabhängig gegen die ursprünglichen Eingabedaten vom Bodenscanner getestet; also sind nur die dabei geprüften Bedingungen (6.2.3) für die Sicherheitsfunktionalität entscheidend.

## 6.4 Verhalten im Fehlerfall

### 6.4.1 Übergang in Fehlerzustand

Die Ebenenerkennung selbst ist zustandslos. Ein Fehlerzustand ist daher nicht vorgesehen. Es wird stattdessen im Fehlerfall, z.B. falls die Prüfung der Ebenenhypothese negativ ausfällt, ein Fehlercode zurückgegeben.

### 6.4.2 Manueller Reset

Ein manueller Reset der Ebenenerkennung ist nicht vorgesehen, da diese zustandslos ist.

## 7 Begriffe, Abkürzungen und Symbole

### 7.1 Begriffe

**Bodenebene** Die mathematisch den Boden beschreibende Ebene

**Bodenscanner** Gegen den Boden gerichteter Scanner am EUC, liefert Daten zur Ebenenerkennung

**Positives Hindernis** Aus dem Boden hervorragendes Hindernis

**Negatives Hindernis** Loch im Boden

**Konfiguration** Gesamtheit der Parameter des Algorithmus (siehe 6.1.4)

### 7.2 Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>vollständiger Begriff</i>
EUC	Equipment under Control
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem

## A Definitionen

In Abschnitt 6.2.1 wird die Funktion  $\arctan2$ , der Arkustangens erweitert auf zwei Argumente, verwendet.  $\arctan2$  ist wie folgt abschnittsweise definiert:

$$\arctan2(y, x) := \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & x < 0, y \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & x < 0, y < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & x = 0, y < 0 \\ 0 & x = 0, y = 0 \end{cases} \quad (29)$$

Motiviert ist diese Definition aus der häufigen Anwendung den Winkel zwischen der x-Achse und einer Strecke vom Ursprung zu einem Punkt  $(x, y)$  in der Ebene zu bestimmen und dabei die Fälle für die verschiedenen Quadranten etc. zu berücksichtigen.

## B Beweise

Die Transformationen zwischen den Darstellungen einer Ebene durch zwei “Kippwinkel”  $(\alpha, \beta)$  und durch einen Normalenvektor  $n = (x, y, z)^T$  aus Abschnitt 6.2.1 sind invers.

Anmerkung: Die Gleichungen in Abschnitt 6.2.1 verwenden  $\arctan2$  entsprechend der Definition in (29), um diverse Sonderfälle abzudecken. Der folgende Beweis wird für den Fall geführt, dass das zweite Argument von  $\arctan2$  größer null ist. Für die übrigen Fälle gelingt der Beweis analog oder ist trivial.

Beweis: Gegeben zwei Winkel  $\alpha, \beta$ , dann gilt:

$$\begin{aligned} \alpha(n(\alpha, \beta)) &= \arcsin(\sin(\alpha)) = \alpha \\ \beta(n(\alpha, \beta)) &= \arctan\left(\frac{\cos(\alpha) \sin(\beta)}{\cos(\alpha) \cos(\beta)}\right) = \arctan\left(\frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta)}\right) = \beta \end{aligned}$$

Für die andere Richtung sei  $n = (x, y, z)^T$  gegeben. Da  $n$  ein Normalenvektor ist, gilt  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ , also:

$$y^2 + z^2 = 1 - x^2 \quad (30)$$

Ferner gelten:

$$\cos(\arcsin(u)) = \sqrt{1 - u^2} \quad (31)$$

$$\sin(\arctan(u)) = \frac{u}{\sqrt{1 + u^2}} \quad (32)$$

$$\cos(\arctan(u)) = \frac{1}{\sqrt{1 + u^2}} \quad (33)$$

Damit ergibt sich:

$$x = \sin(\arcsin(x)) = x$$

$$y = \cos(\arcsin(x)) \sin(\arctan(\frac{y}{z}))$$

$$= \sqrt{1-x^2} \frac{\frac{y}{z}}{\sqrt{1+(\frac{y}{z})^2}} \quad \text{Mit (31) und (32)}$$

$$= \frac{\sqrt{1-x^2} y}{z \sqrt{1+(\frac{y}{z})^2}} = \frac{\sqrt{1-x^2} y}{\sqrt{z^2+y^2}} = \frac{\sqrt{1-x^2} y}{\sqrt{1-x^2}} \quad \text{Mit (30)}$$

$$= y$$

$$z = \cos(\arcsin(x)) \cos(\arctan(\frac{y}{z}))$$

$$= \sqrt{1-x^2} \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{y}{z})^2}} \quad \text{Mit (31) und (33)}$$

$$= \sqrt{1-x^2} \frac{z}{z \sqrt{1+(\frac{y}{z})^2}} = \frac{\sqrt{1-x^2} z}{\sqrt{z^2+y^2}} = z$$

□

## Literaturverzeichnis

[Golub u. Van Loan 1996] GOLUB, Gene H. ; VAN LOAN, Charles F.: *Matrix Computations*. Third Edition. Baltimore, Mariland : The Johns Hopkins University Press, 1996

[Thrun u. a. 2004] THRUN, S. ; MARTIN, C. ; LIU, Y. ; HAHNEL, D. ; EMERY-MONTEMERLO, R. ; CHAKRABARTI, D. ; BURGARD, W.: A real-time expectation-maximization algorithm for acquiring multiplanar maps of indoor environments with mobile robots. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 20 (2004), Nr. 3, S. 433–443