

5 Adaptive Bewegungskoordination

Um eine autonome Fortbewegung in unstrukturierter Umgebung zu ermöglichen, sollen Gangmuster für die Fortbewegung in einfachem Gelände geeignet abgeändert und rekombiniert werden. Dazu wird eine Grundmenge einfacher Gangarten ausgewählt. Die ausgesuchten Gangmuster werden auf passende Weise parametrisiert, um die spätere Auswahl möglichst einfach zu gestalten. Wie in Kapitel 4 beschrieben, ist für jedes Bein ein neuronales Netzwerk mit den gewählten Eingangsgrößen und den sich daraus ergebenden Ausgangsgrößen trainiert.

Mit dieser Basis ist die Maschine bereits in der Lage, sich im Rahmen der trainierten und generalisierten Gangmuster in ebenem Gelände fortzubewegen. Um nun auch Mobilität in einem unstrukturierten Umfeld zu ermöglichen, müssen die Gangmuster einzelner oder aller Beine entsprechend modifiziert werden. Dazu ist es notwendig, die Eingangswerte der neuronalen Netze der jeweiligen Situation entsprechend anzupassen. Die Anpassung ist dabei so aufgebaut, daß die Elastizität der Roboterstruktur und die Ungenauigkeiten der Sensorik und der neuronalen Netze auf geeignete Weise mit einbezogen wird. Dies geschieht mit Hilfe lokaler und globaler Mechanismen, die durch sogenannte „künstliche Reflexe“ oder durch planende Module ausgelöst werden.

In diesem Kapitel wird zuerst das prinzipielle Konzept Bewegungskoordination vorgestellt. Im Anschluß daran wird die Architektur erläutert und deren Eingriffsmöglichkeiten skizziert. Die Darstellungen der künstlichen Reflexe und der planenden Module schließen das Kapitel ab.

5.1 Das Koordinationskonzept der Gehmaschine

Im Gegensatz zur WALKINGLIB können bei der neuronalen Steuerung auch die Parameter, die ansonsten für die gesamte Maschine gelten, für jedes Bein einzeln verstellt werden. Dadurch ist es möglich, mit den Gangmustern, die für die Bewegung in einfachem Gelände erzeugt worden sind, durch geeignete Rekombination auch unstrukturiertes Gelände zu bewältigen. Der Eingangsparameter h eines Netzes ergibt sich bei den Trainingsdaten aus der Körperhöhe h_r der Maschine. Betrachtet man diesen Wert isoliert für ein einzelnes Netzwerk, so kann er ebenso als lokale Höhe des zugehörigen Beines aufgefaßt werden. Durch die unabhängige Modifikation des Schrittmachers der einzelnen Beine lassen sich außerdem deren Geschwindigkeit und Phasenlage zueinander beeinflussen. Eine getrennte Änderung der Rotationsgeschwindigkeit ω ist in der Regel nicht sinnvoll. Für die Abwandlung der Geschwindigkeiten in x - und y -Richtung, die sich auf die Schrittlänge auswirken, gibt es begrenzte Einsatzmöglichkeiten, die allerdings bei den hier vorgestellten Methoden nicht genutzt werden.

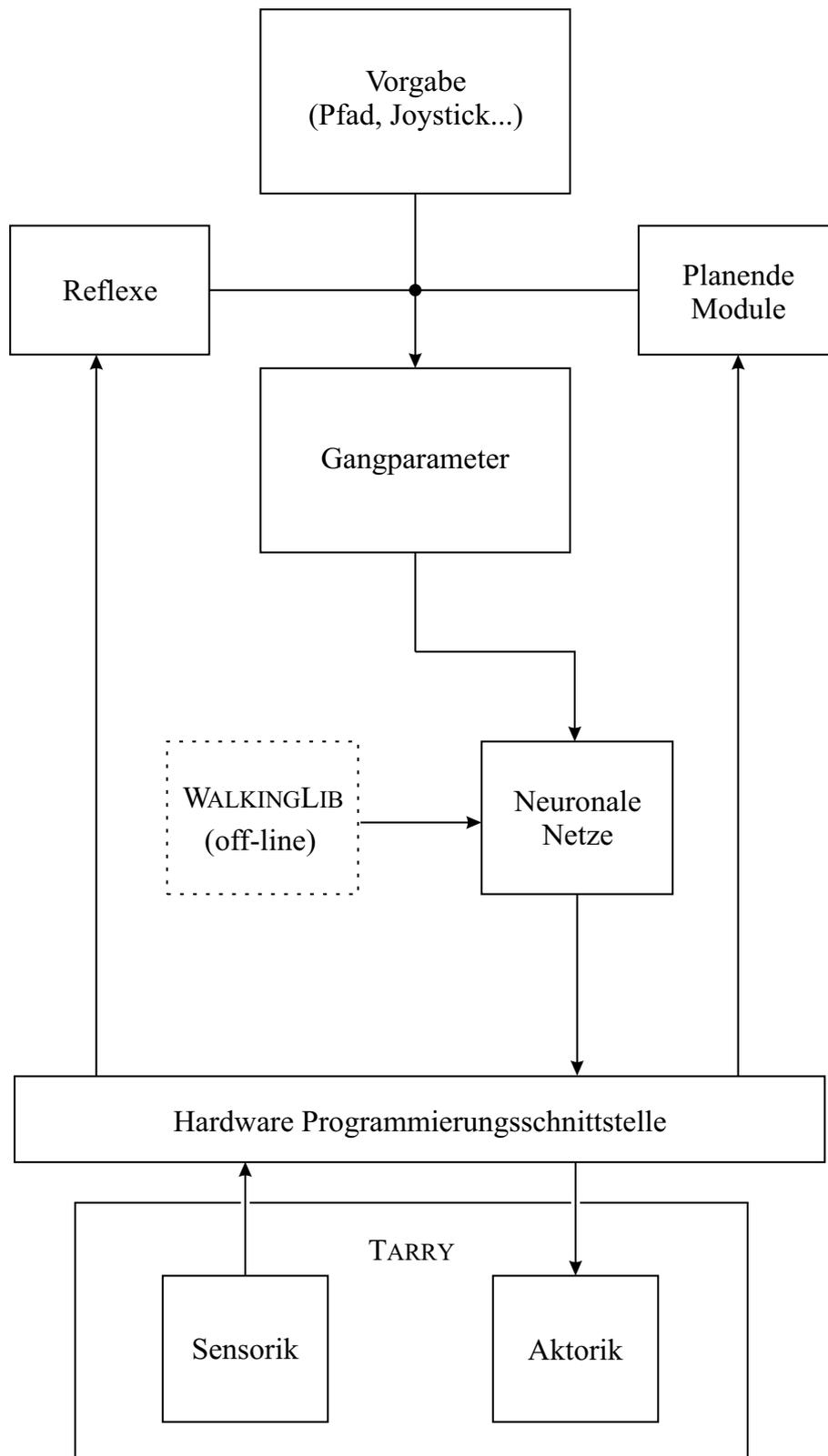


Abbildung 38: Datenfluß bei der TARRY Gehmaschine

Der Aufbau der zugehörigen Koordinationsarchitektur ist in Abbildung 38 dargestellt. Aus den Vorgaben, beispielsweise durch einen Joystick oder durch Standardwerte, werden die in Abschnitt 4.4 erläuterten vereinfachten Gangparameter hergeleitet. Diese dienen als Eingangsmuster für die sechs neuronalen Beinnetzwerke. Die von den Netzen erzeugten Sollwinkel werden über die in Kapitel 3 beschriebenen Mechanismen an die Maschine gesendet und dort entsprechend umgesetzt.

In die umgekehrte Richtung werden die Meßwerte der einzelnen Sensoren über die zugehörigen Dienste distribuiert. Mit Hilfe dieser Meßergebnisse können die unterschiedlichen Adaptionsmechanismen der Maschine aktiv werden. Diese Mechanismen können in künstliche Reflexe und planenden Module unterteilt werden.

Reflexe werden im BROCKHAUS [Bro72] wie folgt definiert:

„Reflex [lat.-frz.] der, *Physiologie*: bei Menschen und Tieren eine *reflektorisch* d. h. auf einen bestimmten Reiz hin regelmäßig eintretende, im allgemeinen vom Willen und von der Mitwirkung des Bewußtseins unabhängige, automatisch erscheinende Reaktion.“

In Anlehnung daran reagieren die künstlichen Reflexe ebenfalls auf bestimmte Reize, die auch aus einer Kombination von Einzelereignissen bestehen können, in einer Art *ad-hoc* Reaktion. Diese Reaktion kann als „automatisch“ bezeichnet werden.

Im Gegensatz dazu sollen die planenden Module Aufgaben lösen, die ein vorausschauendes Verhalten erfordern. Daher sind diese Module eng mit einer Datenspeicherung und einer Modellvorstellung des Maschinenkörpers verbunden.

Die Arbeit und Wirkung der Reflexe und der planenden Module auf die Eingangsparemeter der neuronalen Netze wird in Abbildung 39 genauer dargestellt. Die Parameter selbst bilden zusammen mit den Sensorinformationen die Daten, aufgrund derer die Reflexe oder Planmodule ihr Eingreifen veranlassen. Findet kein Eingreifen statt, handelt es sich um eine ungestörte Bewegung und die unveränderten Parameter dienen als Eingangsmuster für die Beinnetzwerke.

Wenn ein Reflex aktiviert wird, kann dies entweder zu einer lokalen oder einer globalen Maßnahme führen. Eine lokale Maßnahme ist auf die Änderung der Parameter eines einzelnen Beines oder weniger Beine beschränkt. Eine lokale Reaktion ist beispielsweise das Vergrößern einer Beinhöhe während der fortgesetzten Bewegung, um ein verfrühtes Aufsetzen des Fußes auszugleichen.

Eine globale Steuerungsmaßnahme beeinflusst die gesamte Maschine und damit alle Beine. Globale Maßnahmen benötigen daher den Zugriff auf die Parameter aller Beinnetzwerke. Ein solcher Fall tritt beispielsweise ein, wenn ein Bein mit einem Hindernis kollidiert. Die gesamte Maschine hält und weicht ein kleines Stück zurück, um das kollidierte Bein neu zu positionieren und um das Hindernis zu überwinden.

Die Reaktion mit lokalen Maßnahmen ist in der Regel auf kleine Korrekturen beschränkt. Durch die Kombination vieler dieser Maßnahmen läßt sich, wie bei CRUSE [CBD⁺95] gezeigt, eine komplett auf lokalen Reaktionen basierende Bewegungskoordination implementieren. Hiermit kann eine dem natürlichen Vorbild ähnliche, extrem dezentralisierte Kontrolle erreicht werden. Allerdings ist diese Methode, wie bereits in der Einleitung erwähnt, nur sehr schwer erweiterbar und im Hinblick auf Sicherheitsmechanismen ungünstig.

Da die planenden Module in der Regel Modelle oder Datenspeicher verwenden, die Informationen über alle Beine enthalten, kann hier praktisch nicht mehr von lokalen Reaktionen gesprochen werden, selbst wenn von einer Reaktion lediglich ein einzelnes Bein betroffen ist. Aus diesem Grund können die planenden Module lediglich globale Reaktionen auslösen.

5.2 Künstliche Reflexe

Die künstlichen Reflexe und deren Zusammenarbeit sichern die grundlegenden Adaptionsmechanismen der Maschine in komplexer Umgebung. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Auslöser und die Reaktionen der implementierten Methoden.

5.2.1 Aufstandsreflex

Bereits bei AMENDT [Ame95] ist unter der Bezeichnung „Reliefmodul“ eine Methode vorgestellt, die es einer Gehmaschine ermöglicht, leicht unstrukturiertes Gelände, also Untergrund mit leichten Erhebungen und Senken, zu bewältigen.

Dieses Modul agiert aufgrund der Annahmen, daß bei einem korrekten Tripod Gang lediglich die in Abbildung 40(a) gezeigten Aufstandsmuster vorkommen dürfen. Als falsch werden in dieser Methode beispielsweise die in Abbildung 40(b) gezeigten Muster identifiziert. Unter Ausschluß der statisch unmöglichen Aufstandsmuster verbleiben drei korrekte und zwölf fehlerhafte Varianten, die als Trainingsmuster für ein neuronales Netzwerk dienen.

Diese ebenso einfache wie bestechende Methode hat allerdings mehrere Nachteile, die sich in der weiteren Verwendung als problematisch erwiesen haben. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei allen hier verwendeten Gehmaschinen um Mechanismen, deren Fertigungs- und Montagegenauigkeit keinen besonders hohen Ansprüchen genügen sollen und können und zudem eine hohe Elastizität aufweisen. Aus diesem Grund werden die theoretischen Aufstandsmuster der Füße nicht immer erreicht. Wie der Abbildung 41 zu entnehmen ist, entstehen teilweise deutliche Abweichungen von diesen Mustern. Diese Abweichungen würden als zu korrigierende Fehlstellungen eingestuft, obwohl sie im Rahmen der Situation als korrekt zu betrachten sind. Unabhängig von dieser Problematik bietet die oben vorgestellte

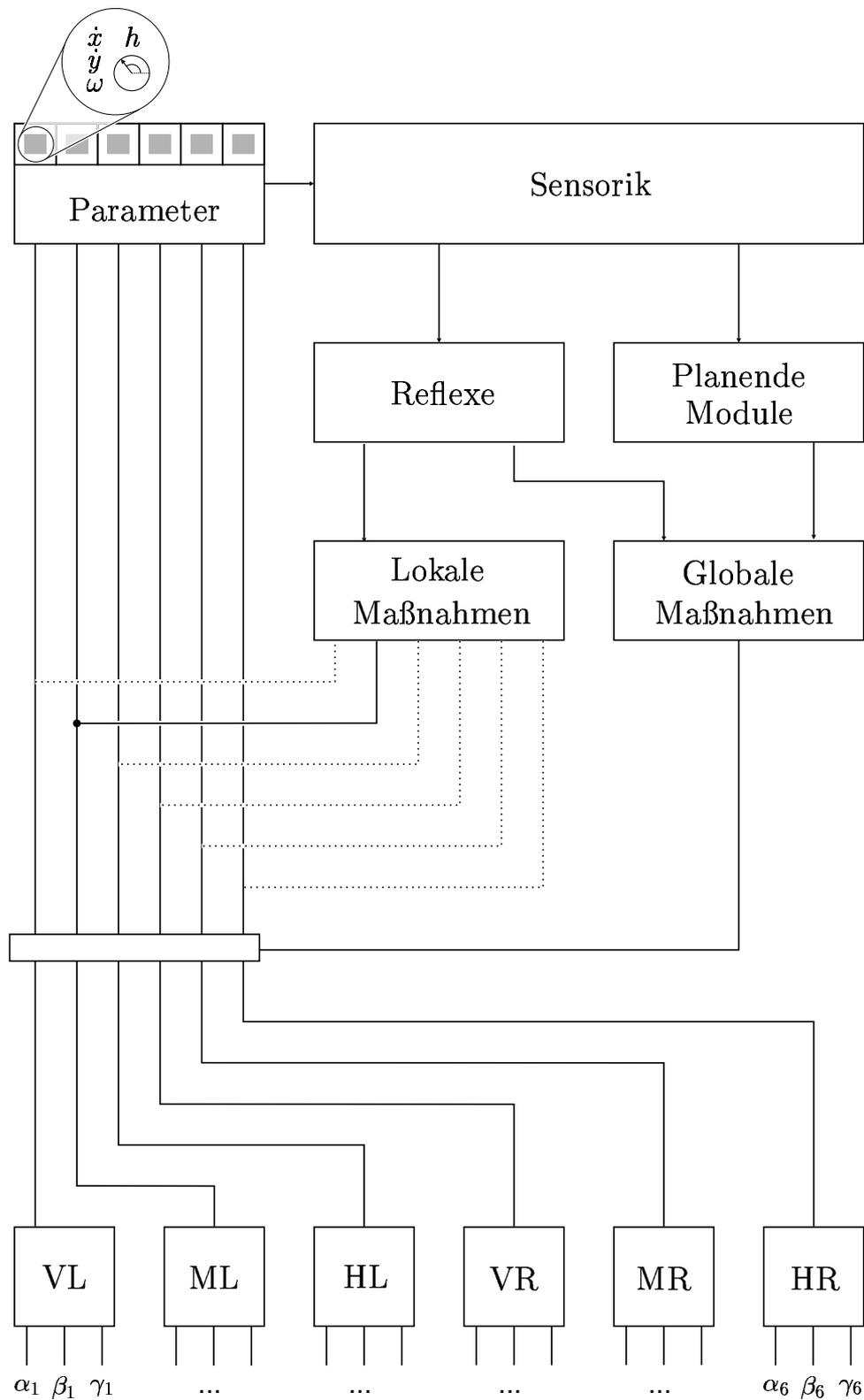


Abbildung 39: Schema der adaptiven Bewegungskoordination

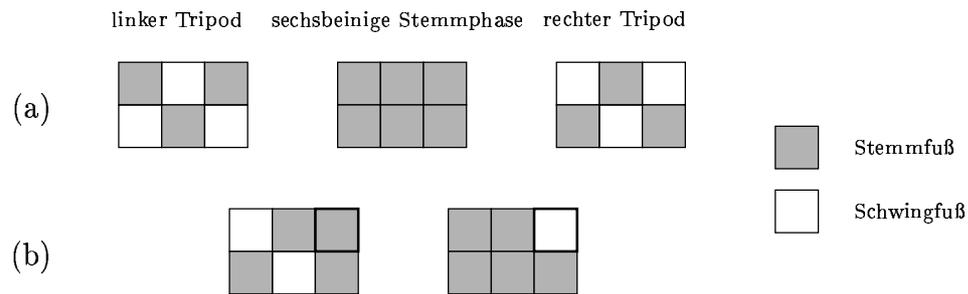


Abbildung 40: Aufstandsmuster eines korrekten Tripod Ganges (a) und bei Störungen des linken vorderen Beines (b)

Methode prinzipbedingt keine Lösung für das gleichzeitige verfrühte Auftreten von zwei Beinen oder den Lauf im Tetrapod- oder Wellengang, da hier die Unterscheidung der korrekten und falschen Aufstandsmuster nicht ohne weitere Information möglich ist.

Um alle Gangarten korrekt behandeln zu können, ist es daher notwendig, eine erweiterte Methode einzuführen. Hierbei bietet es sich an, die Gehmaschine und ihre Interaktion mit der Umwelt als „bestes Modell für sich selbst“⁶ [Bro91] zu verwenden.

Dazu werden die Meßwerte der Fußsensoren während des unbeeinflussten Gangs über eine ebene Fläche aufgezeichnet. Parallel dazu werden die Signale des Schrittmachers protokolliert. Der beispielhafte Verlauf eines solchen Musters ist in Abbildung 41 dargestellt. Hier ist zu erkennen, daß die Aufsetzzeitpunkte der einzelnen Beine um einige Zeitschritte differieren können. Um diesen Zustand bei der Korrektur der Aufstandsmuster in unebenem Gelände zu berücksichtigen, wird ein neuronales Netz trainiert, das die Schrittmachersignale als Eingangs- und die aufgezeichneten Aufstandsdaten als gewünschte Ausgangsmuster verwendet. Die Anzahl der Eingangssignale ist prinzipiell erweiterbar, so daß sich auch weitere Parameter, wie beispielsweise der Kurvenradius, der Duty Faktor oder die Phasenlage der Beine unter Erhebung der zusätzlichen Meßdaten integrieren lassen.

Im Betrieb der Gehmaschine löst das Überschreiten einer Differenz des Ausgangssignals und der gemessenen Werte einen Aufstandsreflex aus. Bei einem verfrühten beziehungsweise verspäteten Aufsetzen wird die lokale Höhe des betroffenen Beines entsprechend vermindert bzw. vergrößert. Ein Beispiel für eine durch diesen Reflex beeinflusste Trajektorie findet sich in Abbildung 42. Bei kleineren Änderungen durch Erhebungen oder Vertiefungen im Boden wirkt dieser Reflex als lokaler Reflex. Die Höhe eines Beines wird angepaßt ohne die Fortbewegung des Roboters zu beeinträchtigen. In einem solchen Fall sind die Änderungen an der realen Fußpunkttrajektorie kaum abzulesen. Dies entspricht in der Abbildung dem im *Bereich*

⁶ „The world is its own best model“

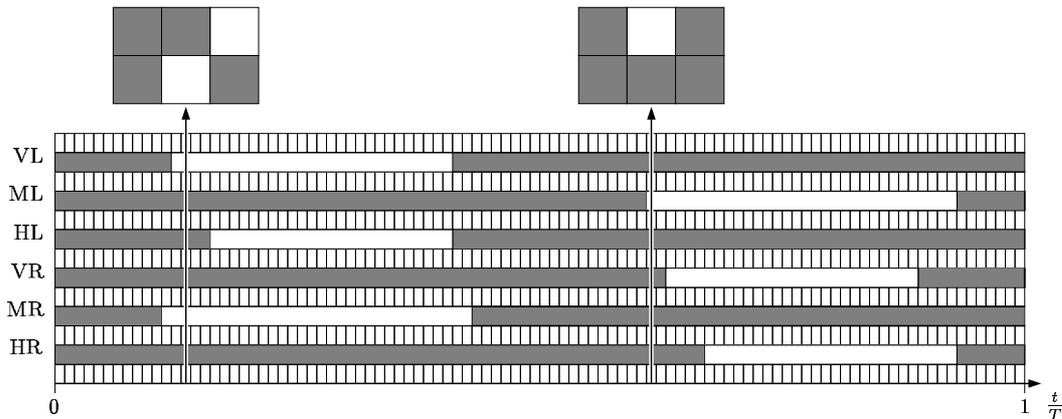


Abbildung 41: Aufgezeichnete Beinaufstandsmuster

A liegenden Teil der Trajektorie. Anders verhält es sich, wenn weitere Kriterien zutreffen. Gilt für die geänderte lokale Höhe h_i eines betroffenen Beines i :

$$h_i > \text{maximum}(h_j + \Delta h_{\max}) \quad \text{mit } j = 1, \dots, 6 \quad \text{und} \quad \Delta h_{\max} \geq 0$$

deutet dies auf größere Vertiefung hin⁷. In diesem Fall wird eine globale Maßnahme ausgelöst, die die Fortbewegung stoppt und das korrekte Standmuster durch lokale Korrekturen an der Beinhöhe wiederherstellt, bevor die Bewegung fortgesetzt werden kann. In der Abbildung ist dies im *Bereich B* zu sehen. Erreicht das Bein die vorgegebene maximal mögliche Höhe, ohne einen Aufsetzpunkt gefunden zu haben, tritt eine weitere globale Maßnahme in Kraft. Die Maschine senkt durch Verringern der Höhe der restlichen Beine den Körper ab, um dem betroffenen Fuß zu ermöglichen, doch noch Bodenkontakt zu bekommen, in der Abbildung zu sehen im *Bereich C*. Mit Hilfe dieses globalen Eingriffs wird die Abhängigkeit von der aktuellen Körperhöhe bei dem Erreichen einer Stufe praktisch eliminiert. Zusätzlich wird es dadurch auch möglich, Stufen mit einem relativ großen Höhenunterschied zu überwinden.

5.2.2 Lagekorrektur

Durch die Verwendung eines Inclinometers (siehe auch Abschnitt 2.3.4) ist es möglich, die Orientierung der Maschine relativ zum Schwerfeld zu messen. Mit Hilfe der gewonnenen Daten können Methoden zur Horizontierung des Roboters implementiert werden. Da auch die Lagekorrektur mit den vorhandenen Parametern der neuronalen Netze arbeitet, muß eine Methode bereitgestellt werden, die lediglich über die

⁷Der Wert Δh_{\max} kann aufgrund der Elastizität der Maschinen normalerweise zu Null gesetzt werden.

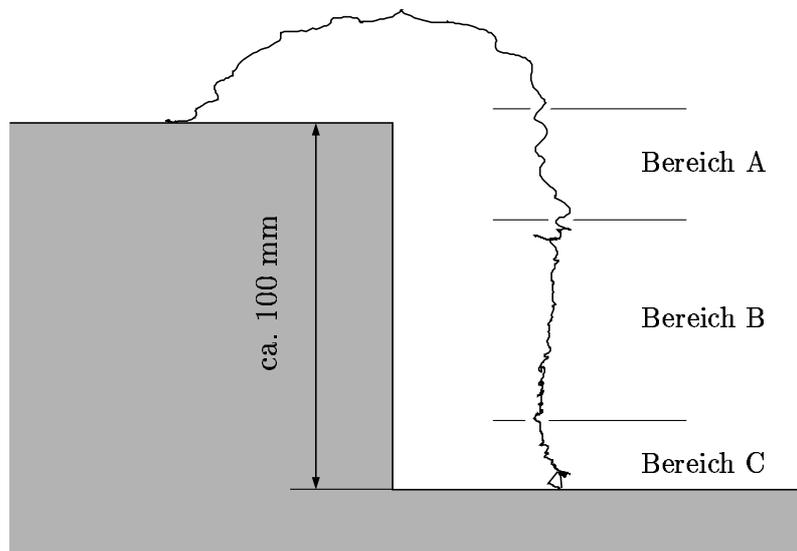


Abbildung 42: Fußpunkttrajektorie beim Absenken eines Fußes⁸

Änderung der lokalen Höhe der betroffenen Beine arbeitet. Da der entwickelte Ausgleichsmechanismus relativ einfach gehalten ist, ist es möglich, daß Aufstandsfehler entstehen. Das heißt, daß Füße durch die lokalen Höhenänderungen unbeabsichtigt Bodenkontakt bekommen oder verlieren. In diesem Fall kommt es zum Eingriff des in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Aufstandsreflexes. Die üblicherweise geringen Abweichungen können hier direkt ausgeglichen werden.

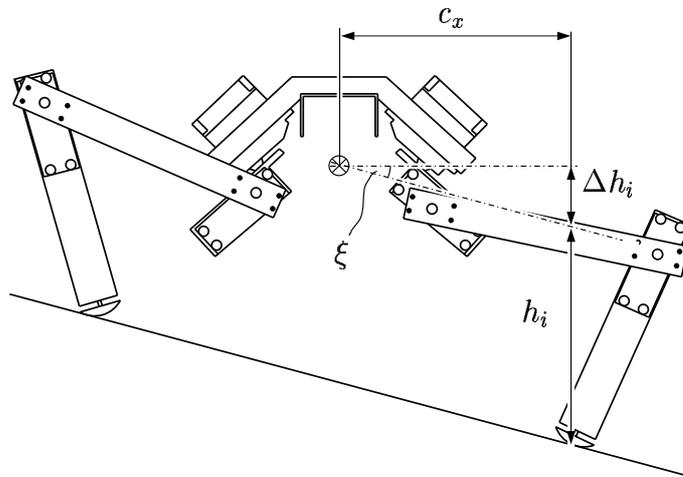
Um die notwendigen Korrekturingriffe zu verdeutlichen, soll zuerst die Maschinengeometrie bei einer Neigung um die x -Achse betrachtet werden.

Wie in Abbildung 43 zu erkennen ist, gilt der Zusammenhang

$$\tan \xi = \frac{\Delta h_i}{c_x} \Leftrightarrow \Delta h_i = c_x \tan \xi$$

Der Parameter c_x hängt dabei von der Schrittbreite der trainierten Gangart ab und läßt sich als $c_x = \frac{w_i}{2}$ den Parametern der WALKINGLIB entnehmen (vergleiche Tabelle 6, Seite 44). Üblicherweise wird für alle gelernten Gangarten und für alle

⁸Für die abgebildete Trajektorie wurde eine Projektion von Daten verwendet, die mit Hilfe eines optischen Meßsystems erfaßt worden sind. Die dreidimensionale Positionsmessung erfolgt mit Hilfe von Markern, die an der Maschine angebracht werden. Aufgrund ihrer Größe können diese Marker nicht am Fuß selbst, sondern erst am *Tibia*-Segment befestigt werden. Somit entspricht der aufgezeichnete Weg auch nicht genau der Fußpunkttrajektorie. Die Lage der Trajektorie relativ zur angedeuteten Umgebung ist daher nur als Orientierungshilfe zu verstehen. Gleiches gilt für die Abbildung 46.

Abbildung 43: Neigung um die r_x -Achse

Beinpaare die gleiche Schrittweite verwendet. Der Wert kann experimentell an die genauen Verhältnisse an der Maschine angepaßt werden.

Die Maschine rollt also um den Winkel ξ wenn die Beinhöhen um $\Delta h_i = c_x \tan \xi$ vergrößert (für die Beine 1, 2 und 3) bzw. verkleinert (für die Beine 4, 5 und 6) werden.

Bei einer Neigung um die y -Achse soll die Neigungsachse der r_y -Achse entsprechen, die durch die *Coxa*-Gelenke der Mittelbeine verläuft. Daher muß in diesem Fall lediglich die lokale Beinlänge der vorderen und hinteren Beine angepaßt werden. Die geometrischen Gegebenheiten sind in Abbildung 44 dargestellt.

Für die Neigung ergibt sich damit für die hinteren Beine (Index 3 und 6)

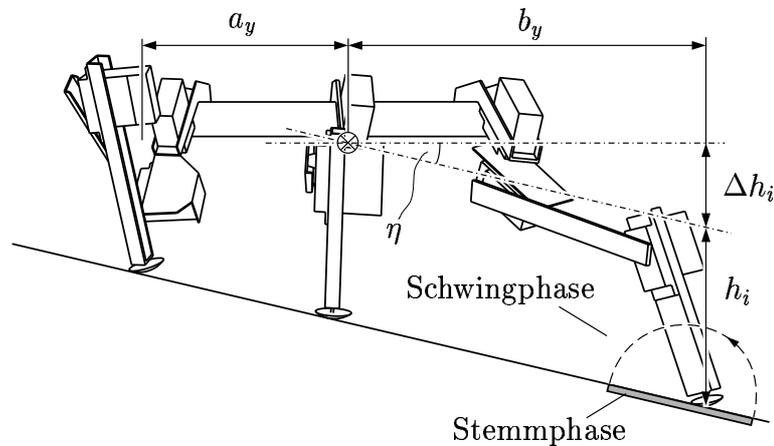
$$\tan \eta = \frac{\Delta h_i}{b_y} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta h_i = b_y \tan \eta$$

beziehungsweise

$$\tan \eta = \frac{\Delta h_i}{a_y} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta h_i = a_y \tan \eta$$

für die vorderen Extremitäten (Index 1 und 4).

Im Gegensatz zum Parameter c_x bei der Neigung um die r_x -Achse sind a_y und b_y nicht nur von der gewählten Gangart sondern auch von der Position des jeweiligen Fußes in der Stemmphase abhängig. Versuche haben jedoch gezeigt, daß die Verwendung konstanter Werte in Verbindung mit dem Aufstandsreflex gute Ergebnisse erzielt.

Abbildung 44: Neigung um die r_y -Achse

Die maximale Steigung, die TARRY II mit dem Zentralkörper parallel zum Untergrund bewältigen kann, liegt, je nach Reibbeiwerten des Untergrundes, im Bereich von 10° bis 14° . Am oberen Ende dieses Bereiches erreichen auch die Servomotoren eine maximale Belastung. Durch Veränderung der lokalen Beinhöhen ist die Maschine in der Lage, eine Neigung von ca. 13° um die r_y - und 17° um die r_x -Achse auszugleichen. Daß die Messung der Daten relativ zur Horizontalen, die Korrektur aber um die körpereigenen Achsen des \mathcal{K}_r -Systems erfolgt stellt kein Problem dar, da die Anpassung in kleinen Schritten und um den Arbeitspunkt „0“ erfolgt. Bei einer Drehung von 15° um beide Achse ergibt sich durch die Differenz der Bezugssystem ein maximaler Fehler von ca. 3,5 %.

Um die tatsächliche Korrektur der Neigung vorzunehmen, wird ein einfacher P-Regler verwendet. Um eine Abweichung zur Horizontalen auszugleichen, wird die Modifikation der Beinhöhen ermittelt, die notwendig wäre, um die gemessene Differenz auszugleichen.

Für den Ausgleich der Neigung gilt für die r_x -Achse:

$$\Delta h_i = \begin{cases} +c_x P_x \tan \xi & \text{mit } i = 1, 2, 3 \\ -c_x P_x \tan \xi & \text{mit } i = 4, 5, 6 \end{cases},$$

beziehungsweise für die r_y -Achse:

$$\Delta h_i = \begin{cases} -a_y P_y \tan \eta & \text{mit } i = 1, 4 \\ +b_y P_y \tan \eta & \text{mit } i = 3, 6 \end{cases}.$$

Wird diese Längenänderung in einem Schritt aufgebracht, gilt also $P_x = P_y = 1$, schwingt das System selbst bei kleinen Auslenkungen auf. Für Werte $P_x = P_y < 0,17$ wird die Neigung ausgeglichen. Eine möglichst schnelle Korrektur ohne Überschwingen wird mit einem Wert von $P_x = P_y < 0,04$ erreicht. Mit diesem Faktor wird eine sprunghaft aufgebrachte Neigung von 5° um die r_x -Achse in ca. 1100 ms ohne Überschwingen ausgeglichen.

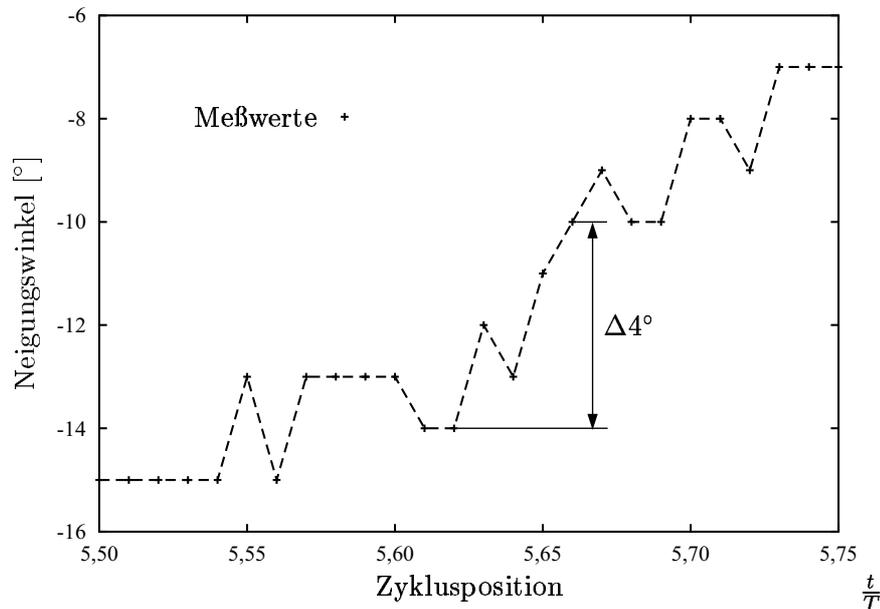


Abbildung 45: Winkelmessung beim Abrutschen vom Hindernis

Erkennung starker Veränderung und Abrutschen von Hindernissen

Die Sensorik im *Tarsus* der Maschine ist nicht in der Lage, die Qualität eines Aufstandpunktes zu beurteilen. Daher kann nicht verhindert werden, daß Kanten oder andere besonders abrutschgefährdete Stellen als Stützpunkte der Beine herangezogen werden. In solchen Positionen kommt es durch die weiteren Bewegungen leicht zum Abrutschen des entsprechenden Beines. Die zugehörige „Flugphase“ des Roboters ist allerdings zu kurz, um sie mit Hilfe der Fußpunktsensoren sicher detektieren zu können.

Als charakteristisches Merkmal eines solchen Abrutschens tritt allerdings eine deutliche Änderung der Neigung ein. In Versuchen wurde festgestellt, daß eine klare Unterscheidung zwischen Neigungsänderungen während des Laufens und während eines Sturzes getroffen werden kann, wenn die Inklinationsänderung in einem bestimmten Zeitraum einen vorgegebenen Wert überschreitet. Bei TARRY II liegt diese Schwelle bei einer Änderung von mindestens $\Delta 4^\circ$ in höchstens 5 Messungen, die 100 ms entsprechen (vergleiche Abbildung 45).

Ein dem Abrutschen vergleichbarer Verlauf der Sensorsignale liegt vor, wenn sich die Maschine auf einer wippenden Vorrichtung bewegt. Schlägt die Wippe um, kommt es zu einer plötzlichen Änderung der Inklinationswerte, die der Änderung bei einem Abrutschen entspricht. Eine solche Wippe hat den Vorteil, daß sich die entsprechende Änderung einfacher herbeiführen läßt und die Maschine beim Testen mechanisch weniger belastet.

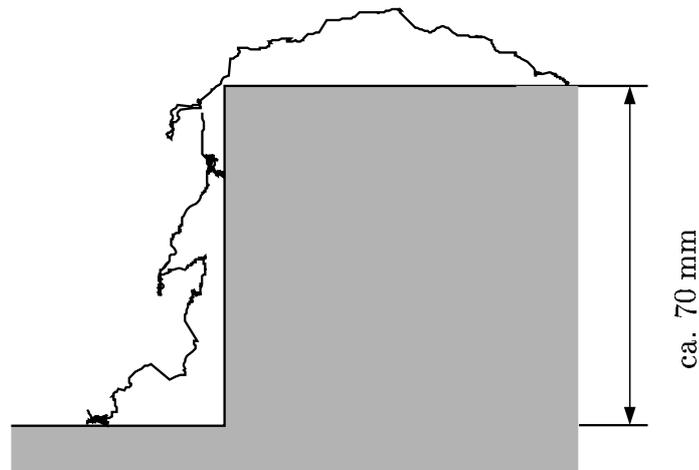


Abbildung 46: Fußpunkttrajektorie beim Übersteigen eines Hindernisses mit doppelter Kollision

Solange die Sensorik keine Neigungsänderung ermittelt, die dem beschriebenen Abrutschen entspricht, werden die globalen Änderungen an den Beinhöhen vorgenommen, ohne den Schrittmacher der Maschine zu beeinflussen. Andernfalls wird die Maschine angehalten und es findet eine Anpassung der Neigung statt. Während dieses Zeitraumes besteht auch die Möglichkeit, ein eventuell fehlerhaftes Aufstandsmuster zu korrigieren.

5.2.3 Levator-Reflex

Die Aufgabe des Levator-Reflexes ist es, der Maschine das Übersteigen von Hindernissen zu ermöglichen. Der Reflex wird durch die Kollision mit einem Hindernis ausgelöst. Um diese Kollision zu detektieren, wird die in Abschnitt 2.3.1 beschriebene Messung der Leistungsaufnahme der Servomotoren eingesetzt.

Während der Schwingphase eines Beines werden die gemessenen Leistungswerte der Servomotoren fortlaufend in einem Ringspeicher festgehalten. Dieser Speicher enthält mehrere Meßwerte, wobei ein neuer Wert den jeweils ältesten überschreibt. Enthält dieser Speicher eine Anzahl von Meßwerten, die die vorher ermittelte Reizschwelle übersteigen, wird der Reflex ausgelöst. Um diese Reizschwelle festzulegen, werden die maximalen Werte der Leistungsaufnahme in der Schwingphase bestimmt. Zu diesem Zweck wird der Roboter in einer vertikalen Position gehalten, während verschiedene Gangmuster abgespielt werden. Die dabei entstehenden Maximalwerte werden als Auslöser für den Reflex festgehalten. Durch die starke Differenz zwischen den Kollisionswerten und den Werten bei ungestörtem Lauf, sowie der Forderung nach mehreren überschreitenden Werten, können Fehlauflösungen sehr sicher vermieden werden.

Bedingt durch den Aufbau und die Struktur der Maschine findet vor der deutlichen Erhöhung der Leistungsaufnahme auch eine elastische Verformung der beteiligten Elemente statt. Daher wird dieser Reflex meist erst ausgelöst, wenn bereits enger Kontakt mit dem Hindernis vorliegt. Um die Bewegungsfreiheit des betroffenen Beines wieder herzustellen, wird zuerst die gesamte Maschine durch Umkehren der Schrittmacher um einige Teilschritte zurückbewegt. Dadurch wird der Kontakt zwischen Bein und Hindernis stark reduziert. Im Anschluß daran wird das betroffene Bein durch weitere Beeinflussung seines Schrittmachers weiter zurückgezogen. Bereits während dieser Rückbewegung wird die lokale Höhe des Beines reduziert, das Bein damit näher an den Körper bewegt. Im Anschluß an diese Rückbewegung und die damit verbundene Befreiung vom Kollisionspartner wird versucht, die Schrittmacherposition zum Zeitpunkt der Kollision wieder zu erreichen, während die lokale Beinhöhe weiter reduziert wird. Die nicht betroffenen Beine setzen wieder in die Bewegung mit ein, sobald die Position erreicht wird, an der sie nach ihrer Rückwärtsbewegung angehalten wurden. Kommt es während dieses Versuches zu einer erneuten Kollision, wird die Prozedur wiederholt. Dies geschieht so lange, bis das Hindernis überstiegen worden ist oder die minimale lokale Beinhöhe erreicht worden ist. Wenn die minimale Höhe erreicht worden ist muß das Hindernis als unübersteigbar aufgefaßt werden. In diesem Fall tritt die Maschine den Rückzug an. Während des gesamten Vorgangs wird die Schrittmachergeschwindigkeit deutlich reduziert. Das ursprüngliche Tempo wird erst wieder aufgenommen, wenn die Schrittmacherposition, die bei Beginn der Kollision vorlag, um einen gewissen Wert überschritten worden ist. Direkt aufeinanderfolgende Kollisionen, die durch eine ungünstige Hindernisform entstehen können, lassen sich so besser behandeln.

Die Fußtrajektorie, die bei einer doppelten Kollision mit einem Hindernis entsteht, ist in Abbildung 46 dargestellt. Die abgebildete Trajektorie wurde aus einer Videoaufzeichnung übertragen und gibt damit den Verlauf des Fußes im Rahmen der möglichen Genauigkeit wieder.

5.2.4 Rückführungsreflex

Als nachgeordneter Reflex ist der sogenannte Rückführungsreflex zu erwähnen. Dieser Reflex dient dazu, im ungestörten Lauf die veränderten lokale Beinhöhen wieder auf ein neutrales Niveau zurückzuführen.

Dieser Reflex tritt in Kraft, wenn keine anderen Reflexe ausgelöst worden sind. Werden Abweichungen von den neutralen Werten festgestellt, so erfolgt eine Korrektur der Beinhöhen, soweit dies möglich ist, ohne die Inklination zu beeinflussen. Durch diesen Reflex paßt sich die Körperhöhe beispielsweise nach dem Ersteigen einer Rampe, bei dem die lokalen Beinhöhen aller Beine verringert werden, wieder an die ursprünglichen Werte an.

5.3 Planende Module

Neben den Reflexmodulen, die eine Reaktion unmittelbar auf einen auslösenden Reiz hin veranlassen, bietet die Kontrollarchitektur Raum für sogenannte „planende Module“. In diesen Modulen sind Mechanismen enthalten, die von dem einfachen Reiz-Reaktionsschema abweichen, und die Möglichkeit zu planender und vorausschauender Handlung bieten. Um dies zu ermöglichen, greifen sie auf Selbst- und Weltmodelle zurück, in denen die Umgebung und die Maschine abgebildet werden. Ihre Funktionsweise und die entsprechenden Modelle werden in diesem Kapitel beschrieben.

5.3.1 Umgehung großer Hindernisse

Die für TARRY II eingesetzte Hindernisumgehungsstrategie dient dazu, der Maschine in einem von außen unbeeinflussten Lauf in unbekanntem Gelände eine möglichst langandauernde Fortbewegung zu ermöglichen. Dazu ist es notwendig, unüberwindbare Hindernisse, wie Wänden oder große Gegenstände, möglichst vor einer Kollision zu erkennen, und ihnen ohne die zwangsläufig scheiternden Überwindungsversuche auszuweichen.

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.3.5 vorgestellten Ultraschallsensoren oder vergleichbaren Modellen ist es möglich, vor der Maschine liegende Hindernisse mit einer weiten Varianz von Materialeigenschaften zu erfassen. Aufgrund der gewonnenen Daten, der Kenntnis der Ausmaße der Gehmaschine und der aktuellen Bewegungsparameter kann eine mögliche Kollision vorhergesagt und die Bewegung angepaßt werden, um das Hindernis zu umgehen.

Der entsprechende Ultraschallsensor wird so an der Gehmaschine angebracht, daß er mit Hilfe eines Servomotors relativ zur Längsachse der Maschine gedreht werden kann. Aus den Angaben in Abschnitt 2.3.5 und entsprechenden Messungen kann bei einer Reichweite von 2 m eine maximale Meßdauer von 13 ms ermittelt werden. Bei den üblichen Geschwindigkeiten liegt die zurückgelegte Strecke während einer solchen Messung damit in der Größenordnung von 1 mm und beeinflußt daher das Meßergebnis praktisch nicht. Um den gesamten Bereich zu erfassen, wird in verschiedenen Winkelpositionen nacheinander gemessen. Nach der Messung in einem der äußeren Kegel ändert sich die Drehrichtung des Servomotors. Eine Darstellung des erfaßten Bereiches mit exemplarischen Hindernissen findet sich in Abbildung 47(a). Die sich daraus ergebenden Meßergebnisse sind in Abbildung 47(b) veranschaulicht. Dabei ist auch zu erkennen, daß für die gemessenen Ultraschallkegel die genaue Hindernislage im Sektor nicht ermittelt werden kann, da der Sensor nur die Entfernung, aber keinen Winkel erfaßt. Um eine einfache Kollisionsberechnung zu ermöglichen, wird der sich ergebende Bogen durch einzelne Punkte ersetzt. Die Anzahl der zusätzlich zu den begrenzenden Ecken notwendigen Punkte ergibt sich aus der Breite der Maschine und der Bogenlänge des Kreissektors.

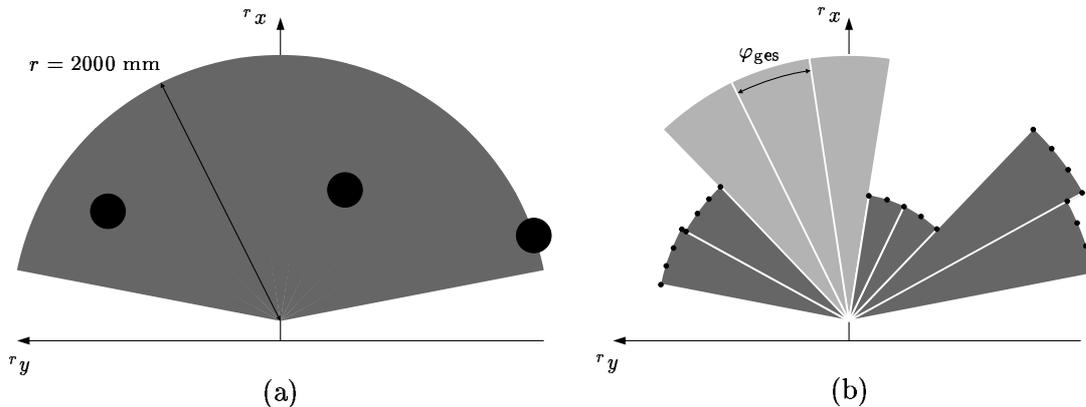


Abbildung 47: Mit dem Ultraschallsensor überstrichener Bereich mit Hindernissen (a) und die daraus ermittelten Meßdaten (b)

Durch die Zeitspanne, die benötigt wird, den beschriebenen Bereich vor der Maschine jeweils einmal komplett zu vermessen, entstehen einige Ungenauigkeiten. Daher sollte die Vorwärtsgeschwindigkeit der Maschine so festgelegt werden, daß der zurückgelegte Weg des Roboters während eines Sensorumlaufes nicht zu groß wird. In dem vorliegenden Fall muß wegen der großen Reichweite des Sensors und der generell verhältnismäßig niedrigen Geschwindigkeit der Maschine keine Anpassung vorgenommen werden. Als prinzipielles Handicap bleibt die durch die zeitlich aufeinanderfolgenden Messungen unterschiedlichen Referenzpositionen der gespeicherten Entfernungen. Da aber eine Zwischenspeicherung und verzögerte Nutzung oder eine rechnerische Korrektur der Daten vermieden werden soll, wird diese Ungenauigkeit in Kauf genommen. Eine mögliche Lösung dieses Problems wäre die Verwendung mehrerer Sensoren, die eine gleichzeitige Messung ermöglichen würden.

Bedingt durch das Sichtfeld des Ultraschallsensors ist die vorgestellte Strategie nur sinnvoll, wenn sich die Maschine nicht rückwärts bewegt. Die Eingangswerte \dot{x} , \dot{y} und ω des neuronalen Netzwerkes bestimmen den Weg der Gehmaschine. Im Inertialsystem bildet dieser Weg eine Kreisbahn mit dem Mittelpunktvektor

$${}^r \mathbf{x}_m = \frac{1}{\omega} \begin{pmatrix} -\dot{y} \\ \dot{x} \\ 0 \end{pmatrix}$$

und dem Radius $R_m = |{}^r \mathbf{x}_m|$. Der Fall $\omega = 0$ wird für die Hindernisvermeidung mit Hilfe eines sehr kleinen ω -Wertes approximiert. Die Genauigkeit dieser Näherung liegt dabei weit über der durch die Gehmaschine selbst verursachten Abweichungen.

Die Länge des Bogens ergibt sich aus der betrachteten Bewegungsdauer. Dabei ist zu beachten, daß die Abweichungen von diesem theoretischen Weg mit fortschreitendem

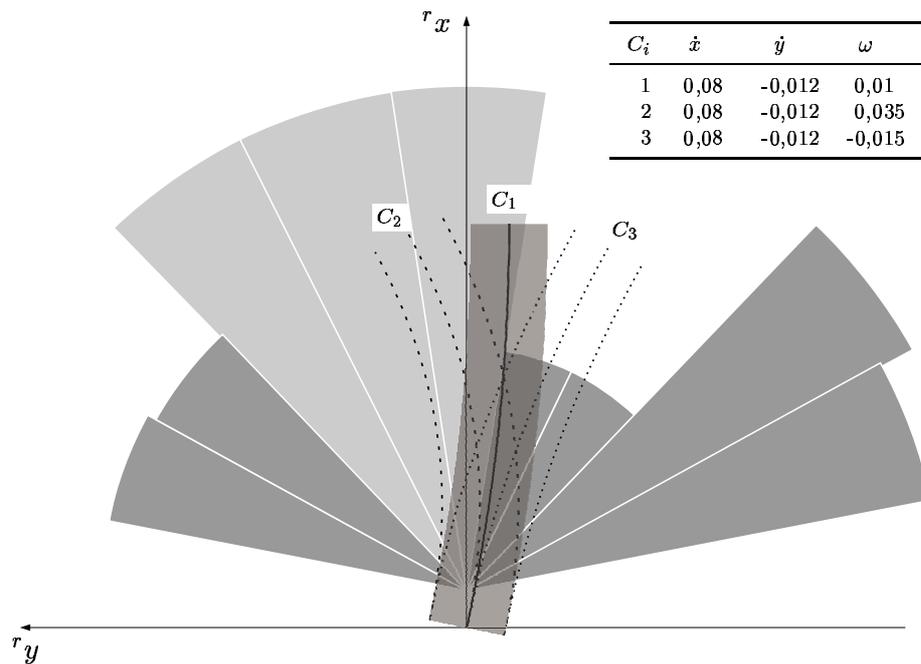


Abbildung 48: Hindernissituation mit dem aktuellen Maschinenweg C_1 und den beiden Alternativwegen C_2 und C_3

Gang immer größer werden. Mit Hilfe dieses Pfades kann die Anzahl der Schritte bis zu einer möglichen Kollision ermittelt werden. Wird eine bestimmte Schrittzahl bis zur Kollision nicht unterschritten, findet keine Reaktion statt.

Unterhalb dieser Grenze wird zuerst die Rotationsgeschwindigkeit ω angepaßt, um auf die Barriere zu reagieren. Sowohl bei einzelnen, räumlich eng umgrenzten Hindernissen, wie Säulen, als auch bei Wänden kann der Zusammenstoß bereits hiermit meist vermieden werden. Um die Richtung der Anpassung zu bestimmen, wird die Anzahl der Schritte bis zu einer Kollision für die um $\pm\Delta\omega$ veränderten Parameter berechnet. Die Bahn, die den längsten Lauf ohne Kollision bietet, wird eingeschlagen. Für die in Abbildung 47 dargestellten Hindernisse sind die entsprechenden Bahnen in Abbildung 48 dargestellt. Der linke Alternativpfad bietet über den betrachteten Zeitraum eine hindernisfreie Fortbewegung und würde daher gewählt. Ist eine Bewegung in die ursprünglich vorgegebene Bewegungsrichtung über die minimale Anzahl von Schritten hinaus wieder möglich, wird diese Richtung erneut eingeschlagen. Da es sich bei diesem Verfahren um eine rein lokale Optimierung handelt, ist es natürlich möglich, daß die kurzfristig richtige Entscheidung sich später als nachteilig erweist.

Durch eine ungünstige Hindernissituation ist es also möglich, daß die Maschine sich in eine Lage manövriert, in der es sehr bald zu einer Kollision kommen wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn durch die Rotation ein Hindernis seitlich in den

Erkennungsbereich des Ultraschallsensors gelangt. Ähnliche Fälle können auftreten, wenn Hindernisse erst spät vom Sensor erkannt werden oder in einer nicht statischen Umgebung Hindernisse „plötzlich“ vor der Maschine auftauchen. Um mit entdeckten Barrieren umzugehen, deren Entfernung einen geringen Mindestabstand unterschreitet, wird die translatorische Bewegung der Maschine eingestellt. Dies verkleinert den Radius des gelaufenen Kreisbogens auf Null und bewirkt damit eine Drehung der Maschine auf der Stelle. Eine sinnvolle Wahl zwischen den beiden möglichen Richtungen mit Hilfe der Ultraschalldaten ist bei den kurzen Distanzen nicht mehr möglich. Stattdessen wird die aktuelle Drehrichtung verwendet, wobei ω auf den Maximalwert verstärkt wird. Diese Methode versetzt die Maschine auch in die Lage, sich beispielsweise aus einem Korridor zu befreien, solange der notwendige Abstand zur Erkennung der Hindernisse mit dem Ultraschallsensor gegeben ist. Bei allen Änderungen erfolgt die Anpassung der Netzwerkparameter über einen P-Regler.

Experimente mit diesen Ausweichbewegungen sind in den Abschnitten 6.7 und 6.8 beschrieben.

5.3.2 Umgebungskarte

Die in Abschnitt 5.2.1 und 5.2.3 vorgestellten Aufstands- und Levator-Reflexe sorgen dafür, daß Kollisionen oder das verfrühte und verspätete Aufsetzen eines Fußes in geeigneter Weise behandelt werden. Hiermit ist es bereits möglich, Hindernisse zu übersteigen. Aufgrund ihrer Implementation als Reflex setzen sie jedoch entsprechende Reize als Auslöser voraus. Um ein Hindernis vollständig zu überwinden, reicht es also nicht aus, wenn nur das Vorderbein kollidiert. Auch die nachfolgenden Beine müssen anstoßen, um den Levator-Reflex auszulösen. Ähnlich verhält es sich, wenn die Maschine das erhöhte Niveau wieder verlassen soll. Um nach einem Hindernis wieder Bodenkontakt zu bekommen, müssen die Füße meist deutlich abgesenkt werden. Dazu ist es oft notwendig, die Maschine anzuhalten, bis ein neuer Aufstandspunkt für das entsprechende Bein gefunden worden ist. Auch diese Prozedur muß gezwungenermaßen für alle Beine wiederholt werden. Ein solches Vorgehen hat zwei Nachteile: Neben der stärkeren mechanischen Belastung durch die erhöhte Kollisionszahl sinkt die Fortbewegungsgeschwindigkeit deutlich.

Eine Methode dies zu verhindern ist der sogenannte *follow the leader* Gang, der auch in der Natur zu beobachten ist. Bei diesem Verfahren verwenden die ipsilateral benachbarten Beine die Aufstandspunkte der rostral gelegenen Füße als nächste Standposition. Durch die geeignete Wahl der Gangparameter ist es auch für die TARRY Gehmaschinen prinzipiell möglich, diese Punkte jeweils mit dem nächsten Schritt zu erreichen. Dies erfordert aber neben der genauen Abstimmung der Parameter eine relativ hohe Ausführungsgenauigkeit, um eine Kollision der *Tarsi* zu vermeiden.

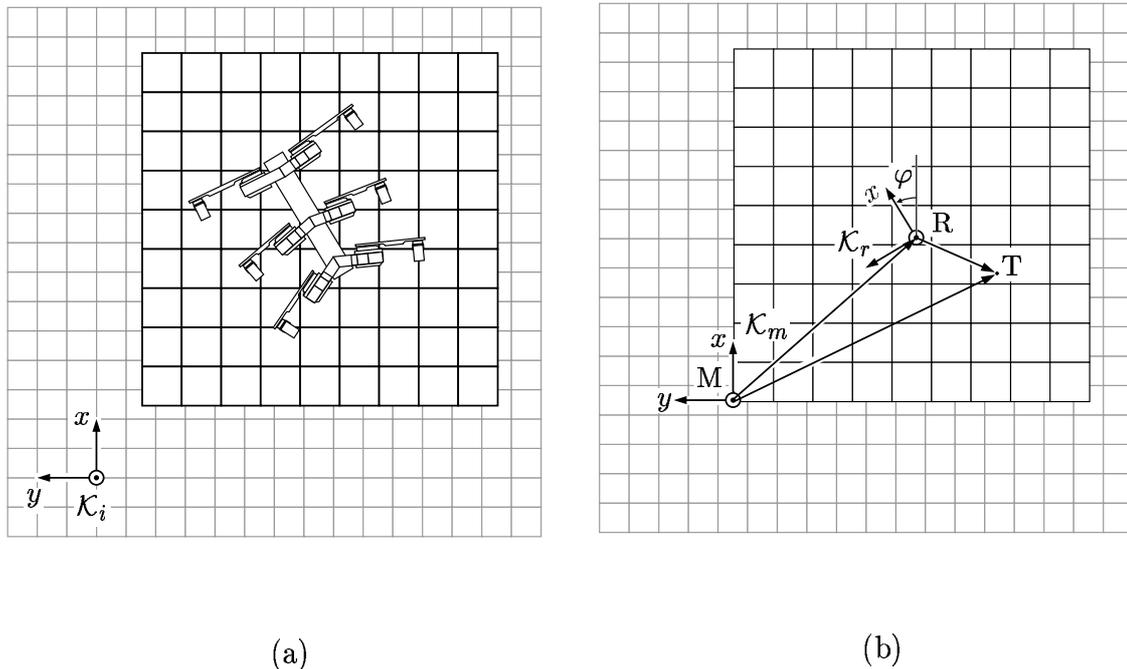


Abbildung 49: Darstellung der Gehmaschine mit Umgebungskarte (a) und mit den zugehörigen Koordinatensystemen (b)

Als Alternative, die auch eine weitergehende Verwendung ermöglicht, ist in [GF00] die Nutzung einer Geländekarte vorgeschlagen worden, die die Umgebung unterhalb der Maschine abbildet. Bei Versuchen, aus den Daten des Ultraschallsensors Karten der weiteren Umgebung zu erzeugen und entsprechend den Bewegungen der Maschine zu verschieben, hat sich gezeigt, daß eine genaue Vorhersage der Position der Gehmaschinen über mehrere Schritte hinaus mit einem relativ großen Fehler behaftet ist. Bei einer Karte, die nur das Gelände unterhalb der Maschine und einen angemessenen Bereich der Umgebung speichert, ist dies nicht problematisch. Durch die Bewegung der Maschine relativ zum Untergrund wird das ursprünglich gemerkte Areal schnell wieder verlassen. Bei einem reinen Vorwärtsgang mit einer Schrittlänge aus dem Bereich der trainierten Muster braucht die Maschine drei bis vier Schritte, um die eigene Aufstandsfläche zu durchmessen. Dadurch werden die gespeicherten Daten schnell genug wieder verworfen bzw. durch neue Werte ersetzt, und die entsprechenden Fehler bleiben klein.

Mit Hilfe der gespeicherten Informationen und den bekannten aktuellen Gangparametern der Maschine soll nun die Fähigkeit, die Bewegung an die Geländestrukturen anzupassen, erhöht werden.

Da sich die Orientierung der Gehmaschine relativ zur Umgebungskarte ändert, sollten die Felder der Karte für die x - und y -Richtung in Anzahl und Länge identisch

sein, um eine Orientierungsabhängigkeit auszuschließen. Zur Bildung der Karte wird der betrachtete Bereich also quadratisch gewählt und in ebensolche Felder aufgeteilt. Jedes dieser Kartenelemente mit der Seitenlänge k beschreibt das repräsentierte Gelände durch den vertikalen Abstand des Untergrunds zum \mathcal{K}_r -System und einen zusätzlichen Parameter, der angibt, ob und in welcher Weise das Feld bereits initialisiert worden ist. Eine schematische Darstellung einer Gehmaschine und der zugehörigen Umgebungskarte findet sich in Abbildung 49(a). Bei dem Feld, das die Karte repräsentiert, handelt es sich um das zum i -System in x - y -Richtung parallelverschobene und skalierte \mathcal{K}_m -System.

Die Informationen zur Bodenhöhe, die in der Karte gespeichert werden, werden mit Hilfe des Maschinenmodells ermittelt. Für ein Bein, dessen Fußpunktsensorik Bodenkontakt signalisiert, wird die Position des *Tarsus* in den Koordinaten des \mathcal{K}_r -Systems, ${}^r\mathbf{r}_{RT}$, mit Hilfe der bekannten Gelenkwinkel über die in der WALKINGLIB implementierte Kinematik berechnet. Sind nun Lage und Orientierung des \mathcal{K}_r -Systems relativ zum \mathcal{K}_m -System bekannt, so kann die Position transformiert und der ermittelte Wert in die Karte eingetragen werden.

Geht man vorerst davon aus, daß sich der Zentralkörper der Maschine parallel zum Untergrund bewegt, dann ist die ${}^r z$ -Achse parallel zur ${}^m z$ -Achse des Kartensystems. Damit ist zur Transformation aus dem körperfesten System die Position des \mathcal{K}_r -Systems und dessen Drehung φ um die z -Achse notwendig. Die Darstellung der entsprechenden Transformation findet sich in Abbildung 49(b). Die Kenntnis dieser Werte vorausgesetzt, ergibt sich für die Position des Fußpunktes in den Koordinaten der Karte:

$${}^m\mathbf{r}_{MT} = {}^m\mathbf{r}_{MR} + {}^m\mathbf{T}_r {}^r\mathbf{r}_{RT}$$

mit

$${}^r\mathbf{T}_m = \begin{pmatrix} k & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k \cos(\varphi) & -k \sin(\varphi) & 0 \\ k \sin(\varphi) & k \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Position und Orientierung der Gehmaschine werden auf eine Lage in der Mitte der Karte und eine Drehung um 0° relativ zur ${}^m x$ -Achse initialisiert. Bei jeder Bewegung der Maschine werden diese beiden Werte entsprechend angepaßt. Dazu werden die Eingangsparameter der neuronalen Netze und die Änderung des Schrittmachers verwendet. Die Werte für diese Anpassung können, ausgehend von den zugrundeliegenden Daten der WALKINGLIB, durch experimentell bestimmte Faktoren an die realen Geschwindigkeiten der Maschine angepaßt werden. Da die Daten in der Karte verhältnismäßig flüchtig sind, ist das Aufsummieren der Fehler dieser Abschätzung nicht problematisch.

Ausgehend von der Startposition liegt der Ursprung des \mathcal{K}_r -Systems über dem mittleren Kartenfeld. Werden die Kanten dieses Feldes durch die Bewegung der Maschine

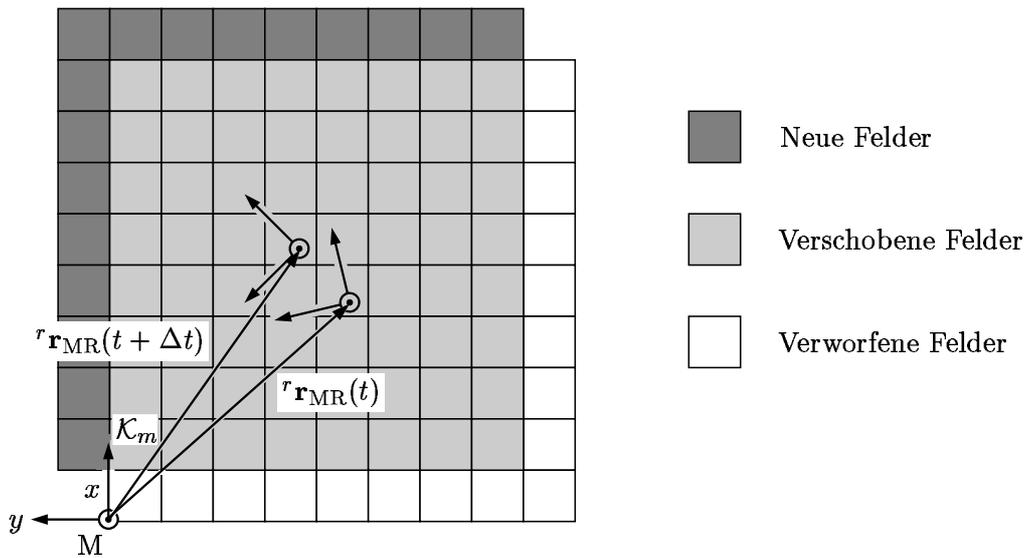


Abbildung 50: Ursprüngliche und verschobene Umgebungskarte

überschritten, so erfolgt eine Anpassung. Dazu werden die Grenzen der Karte so verschoben, daß das Kartenfeld unterhalb des Referenzsprungs die neue Kartenmitte bildet. In Richtung der Verschiebung werden am Kartenrand neue Felder mit einem unbekanntem Zustand eingefügt. Die Daten von Feldern am entgegengesetzten Rand der Karte werden verworfen. Während dieser Verschiebung wird der Positionsvektor des Referenzsystems, r_{MR} , entsprechend angepaßt (siehe Abbildung 50).

Hat nun ein Bein eine feste Standposition, kann, wie in Abbildung 51 dargestellt, mit Hilfe einer konstant festgelegten Referenzhöhe h_{ref} über die aktuelle Beinposition r_{RT} die relative Höhe h_{map} des Aufstandspunktes ermittelt und in die Karte eingetragen werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß nicht nur der Aufstandspunkt selbst, sondern auch dessen Umfeld auf diesem Niveau liegt. Daher wird ein ganzer Bereich in der Karte entsprechend markiert. Alle Felder, deren Mittelpunkt in einem vorgegebenen Radius um den gefundenen Aufstandspunkt liegen, werden auf die ermittelte Höhe gesetzt. Das Feld, über dem sich der *Tarsus* direkt befindet, wird als „sicher“ gespeichert, während der zusätzliche Bereich als „geschätzt“ vermerkt wird. Damit sind bereits erste Vorkehrungen getroffen, um eine erweiterte Methode zu implementieren, die versucht, Geländeformen wie Stufen etc. abzuschätzen.

Vorausschauende Ausweichbewegung

Mit den Daten dieser Karte ist es nun möglich, das Verringern beziehungsweise Vergrößern der Beinhöhen zu veranlassen, bevor es zu einer Kollision kommt. Dazu werden während der Bewegung für alle Beine die unter dem Fußpunkt liegenden

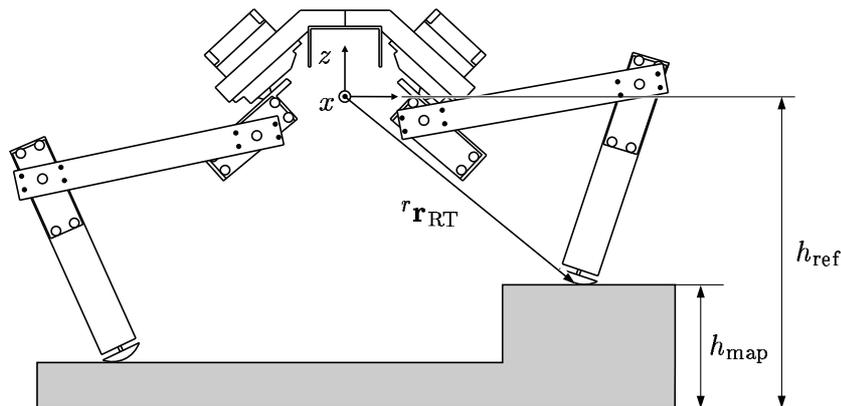


Abbildung 51: Abschätzung der Höhe eines Kartenfeldes

Kartenfelder ermittelt. Ist in dem jeweiligen Feld bereits ein Wert vermerkt worden, wird diese Höhe mit der relativen Höhe des Beines verglichen. Abweichungen zwischen diesen Werten werden durch eine Änderung der lokalen Beinhöhen schrittweise ausgeglichen. Durch die schrittweise Anpassung werden heftige Sprünge vermieden. Das Verfahren verläßt sich damit darauf, daß ein hinreichend großer Bereich in der Karte markiert worden ist, und der Anpassungsvorgang bereits vor dem eigentlichen Hindernis abgeschlossen oder zumindest eingeleitet worden ist. Aufgrund der Objektform kann es allerdings vorkommen, daß das reale Hindernis bereits vor dem markierten Bereich beginnt. In einem solchen Fall kommt es trotz der Karte zur Kollision. Dabei ist zu berücksichtigen, daß weder ein fälschlich ausgelöster noch ein versäumter Anpassungsvorgang ein Problem darstellt, da die vorgestellten Reflexe zur Behandlung einer solchen Situation weiter aktiv sind.

Neigungsdifferenzen zwischen dem Zentralkörper und dem Untergrund

Weicht man nun von der Forderung ab, daß der Zentralkörper parallel zum Boden sein soll, was beispielsweise der Fall sein kann, wenn der in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Reflex aktiv ist, so sind zusätzliche Annahmen notwendig. Während der Roboter in der Lage ist, die Orientierung des Zentralkörpers relativ zur Horizontalen zu messen, muß eine mögliche Neigung des Untergrundes geschätzt werden. Je nach Aufstandssituation haben drei bis sechs Beine Bodenkontakt. Handelt es sich um genau drei Aufstandspunkte, so definieren diese eine eindeutige Fläche. Aber selbst hier ist keineswegs sicher, daß der Untergrund eine Ebene mit der aus diesen Punkten berechneten Steigung ist. Bereits die häufige Situation, daß während eines Tripods das vordere Bein auf ein Hindernis auftritt und das hintere Bein dem nachfolgt, wie in Abbildung 52(a) gezeigt, stellt diese Abschätzung vor ein nicht eindeutig zu lösendes Problem. Die Abbildungen 52(b) und (c) stellen weitere mögliche

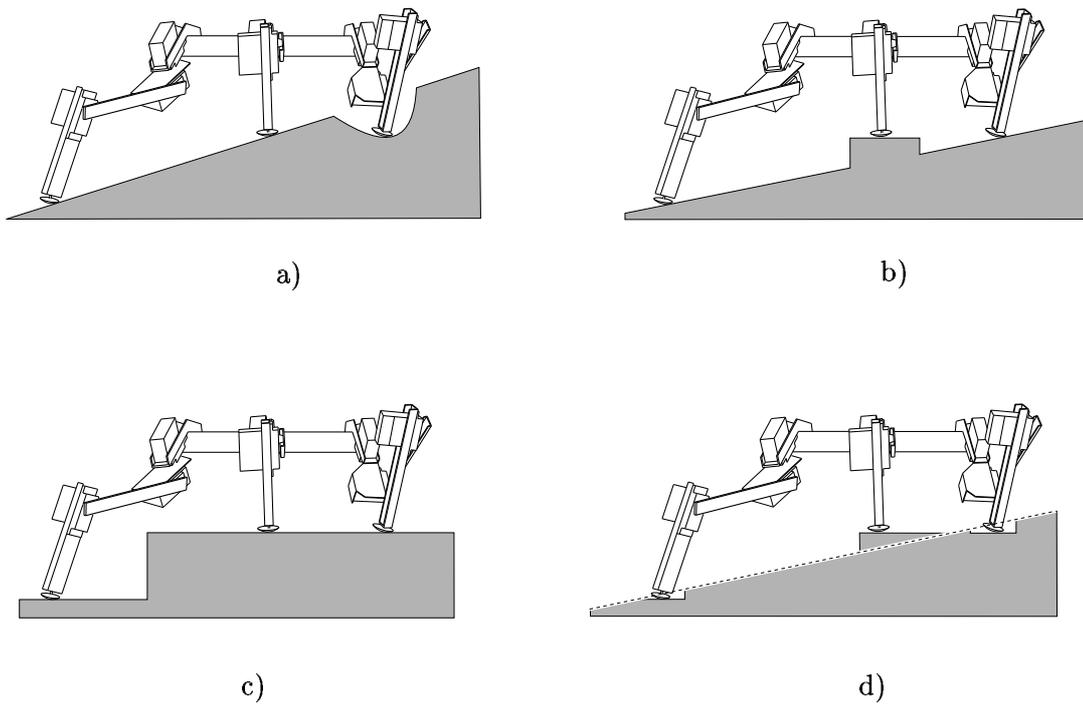


Abbildung 52: Mögliche Deutungen der Umgebung aufgrund der lokalen Beinhöhen in (a), (b) und (c) sowie Ergebnis aufgrund der Regression (d)

Interpretationen dieses Untergrundes aufgrund der Beinhöhen dar. Um den Fehler zu minimieren, wird durch lineare Regression die Ebene mit dem geringsten quadratischen Fehler für alle Beine mit Bodenkontakt abgeschätzt. Die angenommene Ebene, die sich für das gezeigte Beispiel ergibt, ist in Abbildung 52(d) gezeigt.

Die Parameter der geschätzten Ebene dienen nun dazu, sowohl beim Vermerken von Werten in der Karte, als auch beim Vergleich mit aktuellen Beinhöhen, die entsprechend ermittelten Korrekturen abhängig von der Differenz zwischen den Neigungen des Zentralkörpers und der Aufstandsebene zu berücksichtigen. Wie die experimentelle Überprüfung gezeigt hat, ist es damit möglich, das Verfahren beispielsweise auch auf einer schiefen Ebene mit aufgestellten Hindernissen einsetzen zu können.