

## 6 Experimentelle Überprüfung

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Vorgehensweisen sollen dazu dienen, realen Maschinen die autonome Fortbewegung in unbekanntem Gelände zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurden entsprechende Mechanismen und Methoden vorgestellt, um eine solche Fortbewegung zu realisieren.

Im Verlaufe der Entwicklung ist die Funktionstüchtigkeit sowohl der Maschinen als auch der Methoden dauernd überprüft und verbessert worden. Die Versuche stellen dabei das einzig probate Mittel dar, eine Beurteilung der Methoden vorzunehmen. Eine Simulation ist mit den zur Verfügung stehenden Mitteln praktisch nicht möglich, insbesondere aufgrund der hohen Elastizität und der weiteren im System vorkommenden Ungenauigkeiten, beispielsweise aufgrund ungenauer Positionierung der Servomotoren, schwierigen Reibverhältnissen zwischen Füßen und Boden etc.

Um einen Eindruck über den Verlauf der Experimente zu vermitteln, sind einzelne Versuche mit einer Videokamera aufgezeichnet worden. Aus diesen Aufzeichnungen wurden jeweils achtzehn Einzelbilder von charakteristischen Momenten des Bewegungsablaufes ausgewählt und zu einer Abbildung zusammengestellt. Die einzelnen Bilder der Abbildung sind mit den Buchstaben a bis r fortlaufend gekennzeichnet. Die Zeit zwischen den jeweils ausgewählten Situationen ist sowohl zwischen den Experimenten als auch innerhalb einer Sequenz unterschiedlich. In den weiteren Beschreibungen werden diese Bilder beispielsweise mit „in e kann man erkennen...“ referenziert. Soweit nichts anderes erwähnt ist, bezieht sich dies auf die zu der jeweiligen Beschreibung gehörende Abbildung, die jeweils zu Beginn benannt wird.

### 6.1 Fortbewegung in der Ebene

Die einfachste Art der Fortbewegung ist der ungestörte Gang in der Ebene. In Abbildung 53 ist eine solche Bewegung dargestellt. In dem Teilbild a ist die Maschine noch in Ruhestellung am Boden. Aus dieser Position erfolgt bis zu f das Aufstehen. Danach beginnt der Gang mit einem unterstützenden rechten Tripod, der in Bild l beendet wird. Dabei ist gut zu erkennen, daß auch bei dem Gang in der Ebene in k das hintere linke Bein bereits wieder Bodenkontakt hat, während sich das vordere linke Bein noch in der Schwingphase befindet. Nach der kurzen sechsbeinigen Standphase in Bild l wird die Bewegung mit einem linken Tripod fortgesetzt.

### 6.2 Fortbewegung in leicht unstrukturiertem Gelände

Die Fortbewegung in einer leicht unstrukturierten Umgebung erfordert den Einsatz von Reflexen. Das Gelände, in dem sich die Gehmaschine bewegt, ist so gestaltet,

daß in dem gezeigten Experiment keine Kollisionen vorkommen. Bei der in Abbildung 54 dargestellten Bewegung kommt lediglich der in Abschnitt 5.2.1 beschriebene Aufstandsreflex zum Einsatz.

Die Maschine bewegt sich hier auf eine Vertiefung zu. In c ist das vordere linke Bein entsprechend abgesenkt worden. In e hat auch das vordere rechte Bein in dieser Vertiefung Kontakt. Danach ist in f zu erkennen, wie dieses Bein die nachfolgende Erhöhung knapp ersteigt. Aufgrund der günstigen Standposition, ist in dem folgenden Absenkvorgang des mittleren Beines in g und h das langsame Senken dieses Beines zu beobachten. Die Ersteigung der Stufe erfolgt durch den nun anders stehenden Zentralkörper problemlos in Bild j. In k und l bewältigt das erste Bein bereits die zweite Stufe, während das letzte Bein erst in m das Startniveau verläßt. Die Bewegungen wiederholen sich in ähnlicher Form, bis in r alle Beine Kontakt mit den beiden Stufen haben.

### 6.3 Fortbewegung im Gelände mit Hindernissen

Ein Gelände mit Hindernissen erfordert von der Maschine neben den im vorigen Abschnitt angewendeten Aufstandsreflexen den Einsatz des Levator Reflexes, um Hindernisse zu übersteigen. Die sich daraus ergebende Bewegung wird in diesem Abschnitt beschrieben und in Abbildung 55 dargestellt.

In Abschnitt 5.3.2 ist außerdem eine Methode beschrieben, die Höhe der Umgebung unterhalb der Gehmaschine zu speichern, um damit unnötige Kollisionen und ein langsames Absenken der nachfolgenden Beine nach Möglichkeit zu verhindern. Um die Unterschiede durch deren Einsatz zu verdeutlichen, wird ein Hindernis aufgebaut, daß die Bahn der Beine der rechten Maschinenseite behindert. Die Bewältigung dieser Hindernissituation erfolgt in diesem Abschnitt nur durch Verwendung von Reflexen. Im folgenden Abschnitt wird zusätzlich die lokale Karte eingesetzt, mit der Informationen über die Umgebung gespeichert und abgerufen werden können.

In den a und b bewegt sich die Maschine auf das Hindernis zu. In c erfolgt der erste Kontakt mit dem Hindernis. Das Hindernis selbst ist durch die Lage auf dem leicht elastischen Untergrund etwas beweglich und verschiebt sich unter dem Kontakt des Beines leicht vor und zurück. Die Maschine hält an und bewegt sich zurück, um in d nur noch sehr leichten Kontakt zum Hindernis zu haben. Die lokale Beinhöhe wird verringert und es erfolgt in e die zweite Kollision. Nach erneutem Anheben des Beines kommt es beim Ersteigen der Barriere in f nochmals zu einer kurzen Berührung, die durch den kurzen Kontakt aber nicht als Kollision registriert wird. In g beginnt die Überschreitung, die in i mit dem Aufsetzen des Fußes abgeschlossen wird. Die Maschine bewegt sich nun weiter, um den kompletten nächsten Schritt in l zu beenden. In dem folgenden Zyklus kommt es in m zur Kollision des mittleren Beines. Die Berührung erfolgt durch die geänderte Lage der Maschine auf einer

höheren Position, so daß nach der Rückbewegung in *n* bereits mit einem Versuch in *o* die Ersteigung erfolgreich abgeschlossen ist. In *q* beginnt bereits die Absenkung des ersten Beines, deren langsam suchende Bewegung in *r* erfolgreich beendet ist. Im weiteren Verlauf kommt es nun zur Kollision und Ersteigung mit dem hinteren Bein sowie einem zweifachen langsamen Absenken des mittleren und hinteren Beines. Die Absenkung der Beine am Ende des Hindernisses erfolgt für alle Beine analog zu dem im Experiment 6.2 beschriebenen Verlauf.

## 6.4 Hindernisbewältigung mit interner Karte

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Experiment wird nun unter Verwendung der internen Umgebungskarte durchgeführt und in Abbildung 56 dargestellt. Die Hindernissituation ist identisch.

In *a* bis *c* erfolgt erneut die Annäherung an das Hindernis, während es in *d* zur Kollision kommt. Hier ist die Berührung früher erkannt worden, so daß die in Abbildung 46 dargestellte Trajektorie einer vergleichbaren Situation hier leichter wiederzuerkennen ist. Bereits während der Rückwärtsbewegung wird das kollidierende Bein in *f* bis *g* in eine höhere Bahn gehoben. Es erfolgt eine erneute Kollision in *h*, nach der das Bein in *j* bis *k* weiter an den Körper gezogen wird. In dieser neuen, weiter erhöhten Bahn ist es dem Bein nun möglich, daß Hindernis in *l* zu überschreiten und in *m* den Fuß aufzusetzen. In der vorausgehenden Teilabbildung *l* wird erstmals die interne Karte, die auch schon vorher mitgeführt und aktualisiert wurde, mit angezeigt. Dabei ist zuerst eine gleichförmige Fläche zu sehen, die den bisher erkannten glatten Boden repräsentiert. Die Position des *r*-Systems der Maschine ist durch einen dunkelroten Pfeil kenntlich gemacht. In *m* ist das erkannte Hindernis nach dem Aufsetzen des Fußes als erhöhte Fläche markiert worden, was sich durch den roten Bereich <sup>9</sup> darstellt. In *n* hat sich die Maschine ebenso wie das Hindernis in der Karte weiterbewegt. Nach dem ausgeführten Schritt wurden in *n* durch die Ungenauigkeiten, die durch das Aufsetzen des ersten Beines entstanden sind, die vermeintlich etwas niedrigeren Flächen unter den mittleren und hinteren rechten Füßen in die Karte eingetragen. Sie werden durch die blauen Tönungen markiert. In *p* ist der nächste Aufsetzpunkt auf dem Hindernis in der Karte verzeichnet worden. Durch die Weiterbewegung der Maschine liegt nun die zuerst erkannte Erhöhung auf der Höhe des *r*-Systems und damit im Bereich des mittleren Beines. Dadurch kann dieses Bein das vor ihm liegende Hindernis ohne Kollision erkennen und über ein in *q* beginnendes Anheben in *r* das Hindernis ohne vorherigen Zusammenstoß bewältigen. Das nicht mehr gezeigte Absenken erfolgt in ähnlicher Weise. Während das erste Bein sich seinen Aufsetzpunkt tastend suchen muß, können die nachfolgenden Beine diese Information nutzen und das Hindernis damit insgesamt deutlich schneller überwinden.

---

<sup>9</sup>Die gelbe Umrandung entsteht durch die Flanken dieses Bereiches in der grafischen Ausgabe.

## 6.5 Überschreiten einer Wippe

Wie bereits in Abschnitt 5.2.2 erläutert, handelt es sich bei dem Überschreiten einer Wippe und dem Abrutschen von einem Hindernis um sehr ähnliche Vorgänge. Allerdings ist das Überschreiten der Wippe experimentell deutlich leichter auszuführen. Das Experiment wird in Abbildung 57 dargestellt.

In den Teilbildern a bis d bewegt sich die Gehmaschine auf die Kippachse der Wippe zu, bringt sie aber noch nicht zum Umschlagen. Dabei ist deutlich zu erkennen, wie der Körper sich an der Horizontalen ausrichtet. In Abbildung e beginnt das Umschlagen der Wippe, das bis zum Teilbild h andauert. Noch während des Kippens wird in f der vordere linke Fuß aufgesetzt. In i ist zu sehen, wie die Maschine sich wieder aufzurichten beginnt, um die Lage wieder an die Horizontale anzupassen. Dabei kommt es zu einem leichten Überschwingen, das sein Maximum in m findet. Bis zu o wird dieses Überschwingen wieder ausgeglichen und in p beginnt die Maschine den angehaltenen Gang mit dem vorderen rechten Fuß wieder fortzusetzen.

## 6.6 Verhalten an einer Kante

Die Bewegung der Gehmaschine an den Rand einer Ebene ohne dahinterliegende mögliche Aufstandspunkte, verdeutlicht die Abfolge verschiedener Mechanismen, mit denen auf ein Hindernis reagiert wird. Eine entsprechende Situation wird in Abbildung 58 gezeigt.

Die Maschine nähert sich in a der Kante in ungestörtem Gang. In der Teilabbildung b findet das vordere linke Bein keinen Aufstandspunkt. Der lokale Reflex erhöht daraufhin die Beinhöhe, der Schrittmacher läuft aber noch weiter. Kurz darauf befindet sich der Fuß des lokal beeinflussten Beins deutlich unterhalb des Niveaus der anderen Füße. Daher ist als globale Maßnahme der Schrittmacher in c angehalten worden. Die Absenkung des Fußes geht weiter.

In Teilabbildung d hat das Bein die maximale Streckung erreicht, aber immer noch keinen Aufstandspunkt gefunden. Daher wird nun in e versucht, durch Absenkung des gesamten Körpers mittels einer Verminderung der lokalen Höhe der nicht betroffenen Beine, einen Aufstandspunkt für den freien Fuß zu finden.

In Teilabbildung f ist auch dies fehlgeschlagen. Daher wird ein Rückzug vorbereitet. Hier wird zuerst versucht, die Änderungen wieder zurückzunehmen f-h. Danach wird durch einfache Umschaltung der Drehrichtung des Schrittmachers der Rückzug gestartet. Zwischen i und j findet ein kurzes Abrutschen des rechten Vorderbeines statt, das in den Abbildungen nicht beobachtet werden kann. Die hat jedoch keine weiteren Auswirkungen.

Das Abgleiten des linken Beines in l ist nicht stark genug, um den in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Ausgleich auszulösen. Aber durch das Weiterbewegen der Maschine

wird die Kollision in *o* ausgelöst. Daraufhin setzt ein Levator-Reflex ein, der für die entgegengesetzte Bewegungsrichtung beispielsweise auch im Abschnitt 6.3 gezeigt ist. Nach der Bewältigung dieses Hindernisses kann in *r* der Rückzug fortgesetzt werden.

## 6.7 Ausweichbewegung vor einer Wand

In den beiden folgenden Experimenten werden Ausweichbewegungen gezeigt, die aufgrund der vom Ultraschallsensor erkannten Daten veranlaßt werden. Dabei werden zwei prinzipielle Hindernissituationen in Form einer „Wand“ und als „Korridor“ erzeugt. In Abbildung 59 ist durch die gut zu erkennenden gelben Kegel die Hindernissituation „Wand“ realisiert.

Bei Laufbewegungen in Richtung einer solchen Wand wird TARRY II in *a* mit einem Geradeauslauf gestartet und bewegt sich in *c* weiter in dieser Richtung auf das Hindernis zu. In *d* ist die Wand erkannt worden. Aufgrund der geschlossenen rechten Seite ergibt sich ein längerer ungestörter Weg durch das Laufen eines Bogens mittels einer überlagerten Drehung nach links. Bereits in *e* kann erkannt werden, daß der Zentralkörper langsam rotiert. Diese Drehung setzt sich so lange fort, bis ungefähr in *i* erkannt wird, daß der Weg in die ursprüngliche Richtung wieder eine ungestörte Bewegung über die Mindestgrenze von Schritten hinaus erlaubt. Daher werden die alten Parameter wieder hergestellt und die Maschine ist in der Lage, bis *r* das Hindernis im Geradeauslauf sicher zu passieren.

## 6.8 Ausweichbewegung in einem Korridor

Im letzten Experiment wurde die Maschine in einem durch die gelben Kegel gebildeten Korridor plaziert, der in Abbildung 60 dargestellt ist. Die Bewältigung dieses Hindernisses durch Überlagern der normalen Vorwärtsbewegung mit einer Rotation ist nicht mehr möglich.

Nach dem Start in *a* bewegt sich die Maschine zuerst weiter auf das Hindernis zu, während der Ultraschallsensor die Umgebung abtastet. Bevor der durch das vorausliegende Hindernis eingeleitete Lauf eines Bogens deutlich sichtbar wird, ist der notwendige Mindestabstand zum Stop der Translationsbewegung in *d* erreicht. Der aktuelle Eingangswert  $\omega$  des neuronalen Netzes zur Steuerung der Drehung wird auf den Maximalwert erhöht, während die Translationsbewegung eingestellt wird. Dies führt zu einer Drehung auf der Stelle in *e* bis *l*. An dieser Position wird erkannt, daß eine ungestörte Bewegung mit den ursprünglichen Parametern wieder möglich ist, so daß in *m* und *n* erneut eine Vorwärtsbewegung erfolgt. Durch ein außerhalb des gezeigten Bereiches liegendes Hindernis wird in *o* eine Rechtskurve eingeleitet, unter deren Einfluß die Maschine schließlich den Korridor verläßt.



Abbildung 53: Fortbewegung in der Ebene



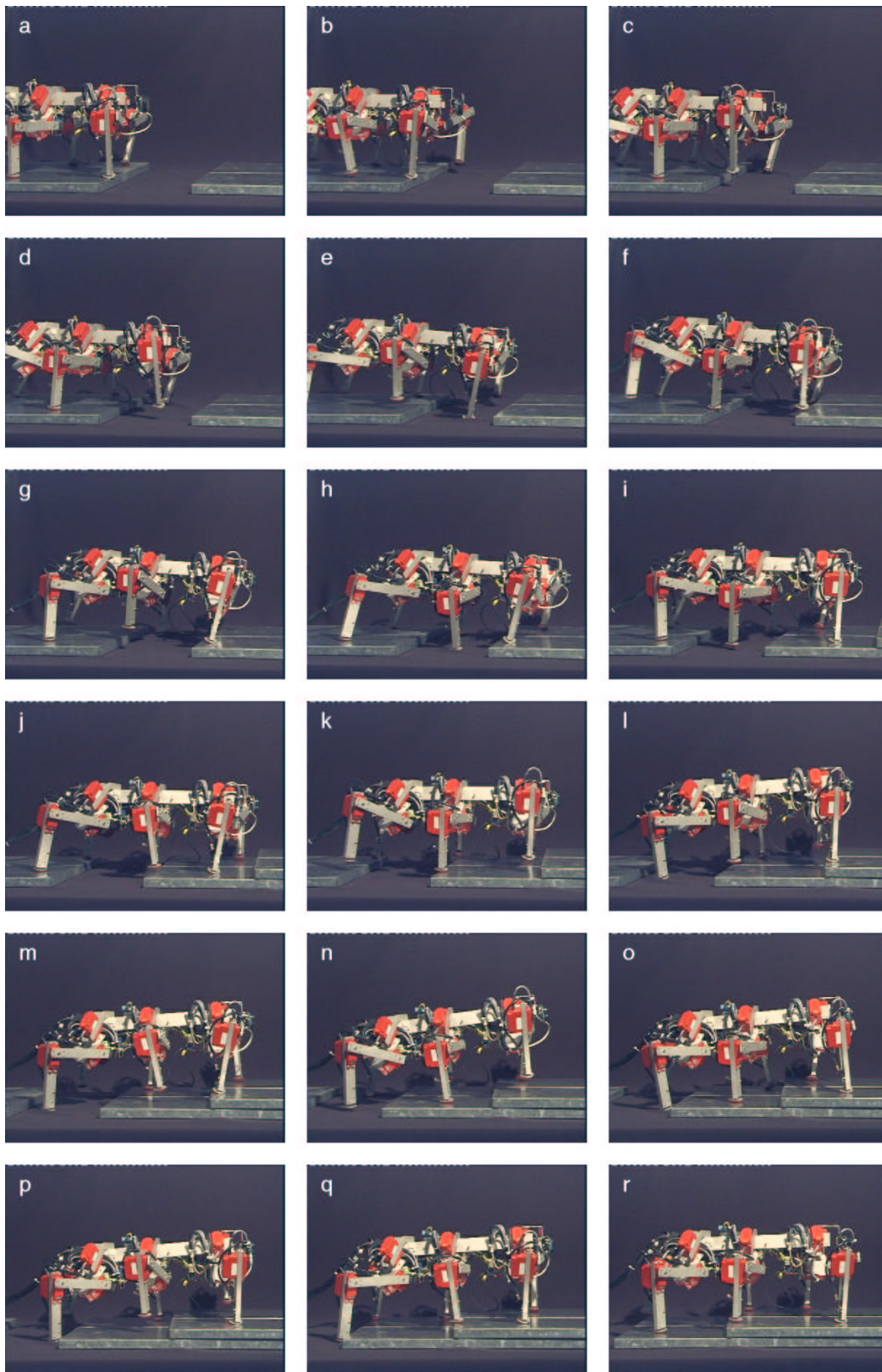


Abbildung 54: Leicht unstrukturiertes Gelände

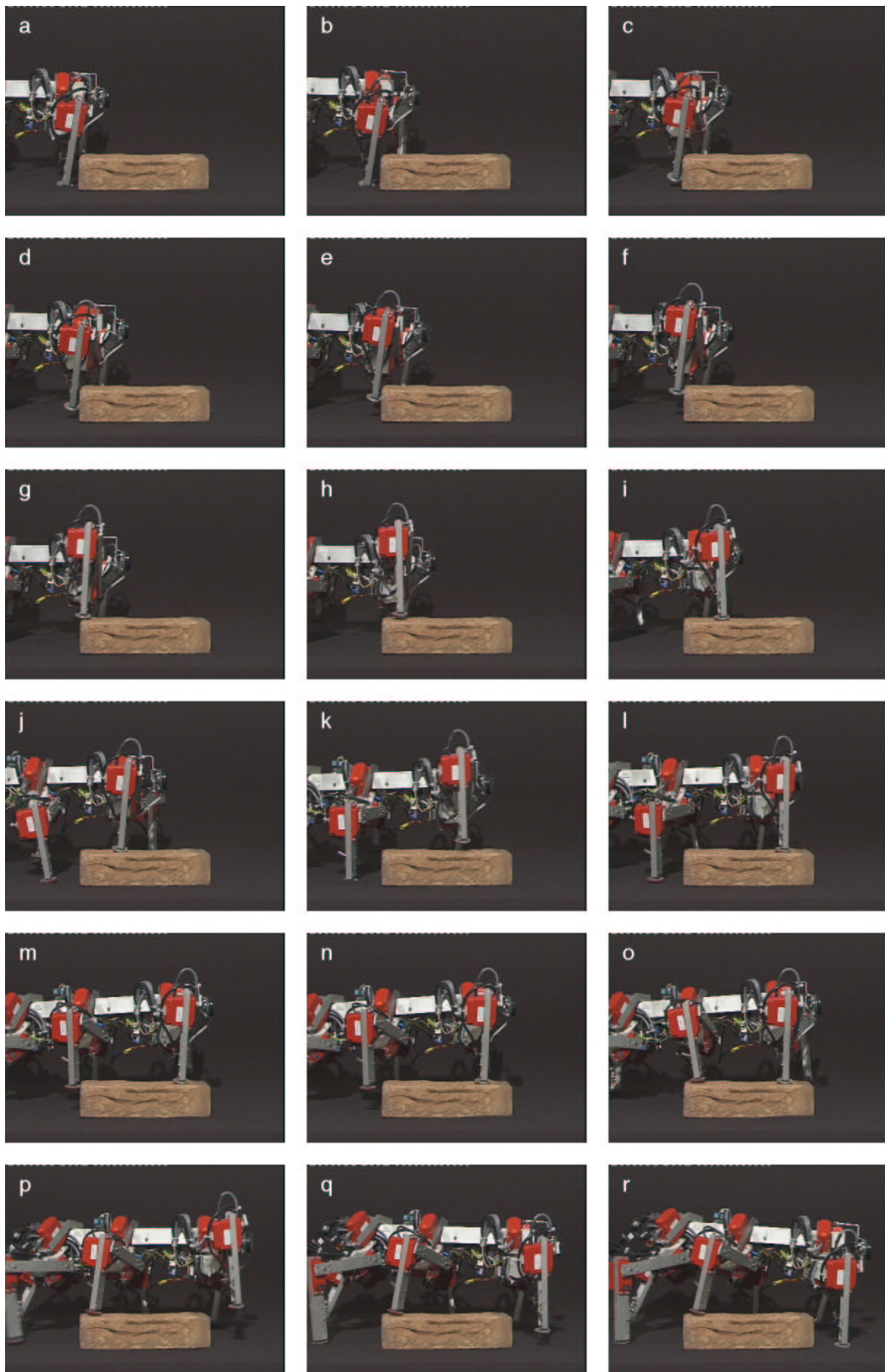


Abbildung 55: Überschreiten eines Hindernisses



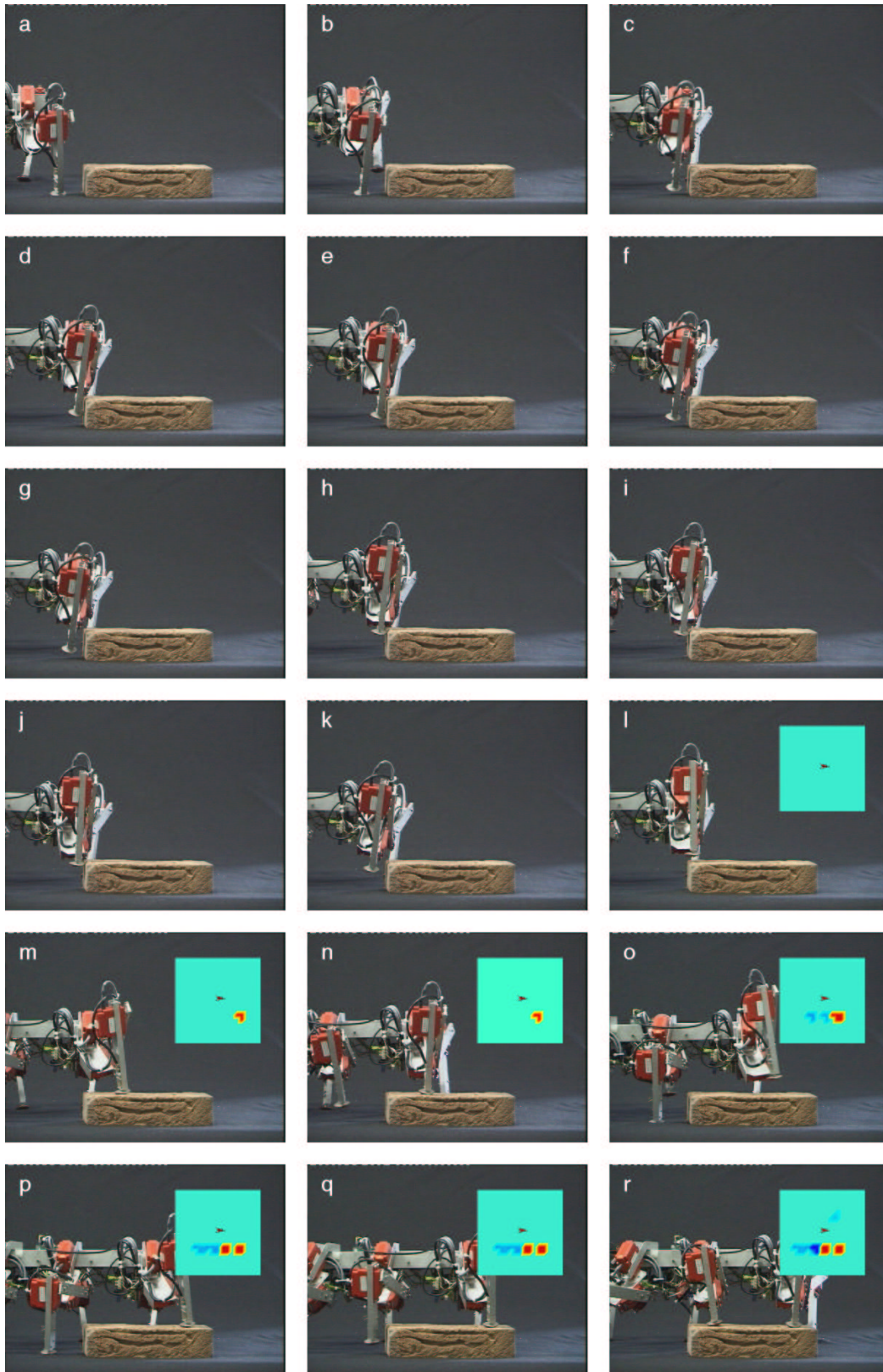


Abbildung 56: Überschreiten eines Hindernisses mit interner Karte

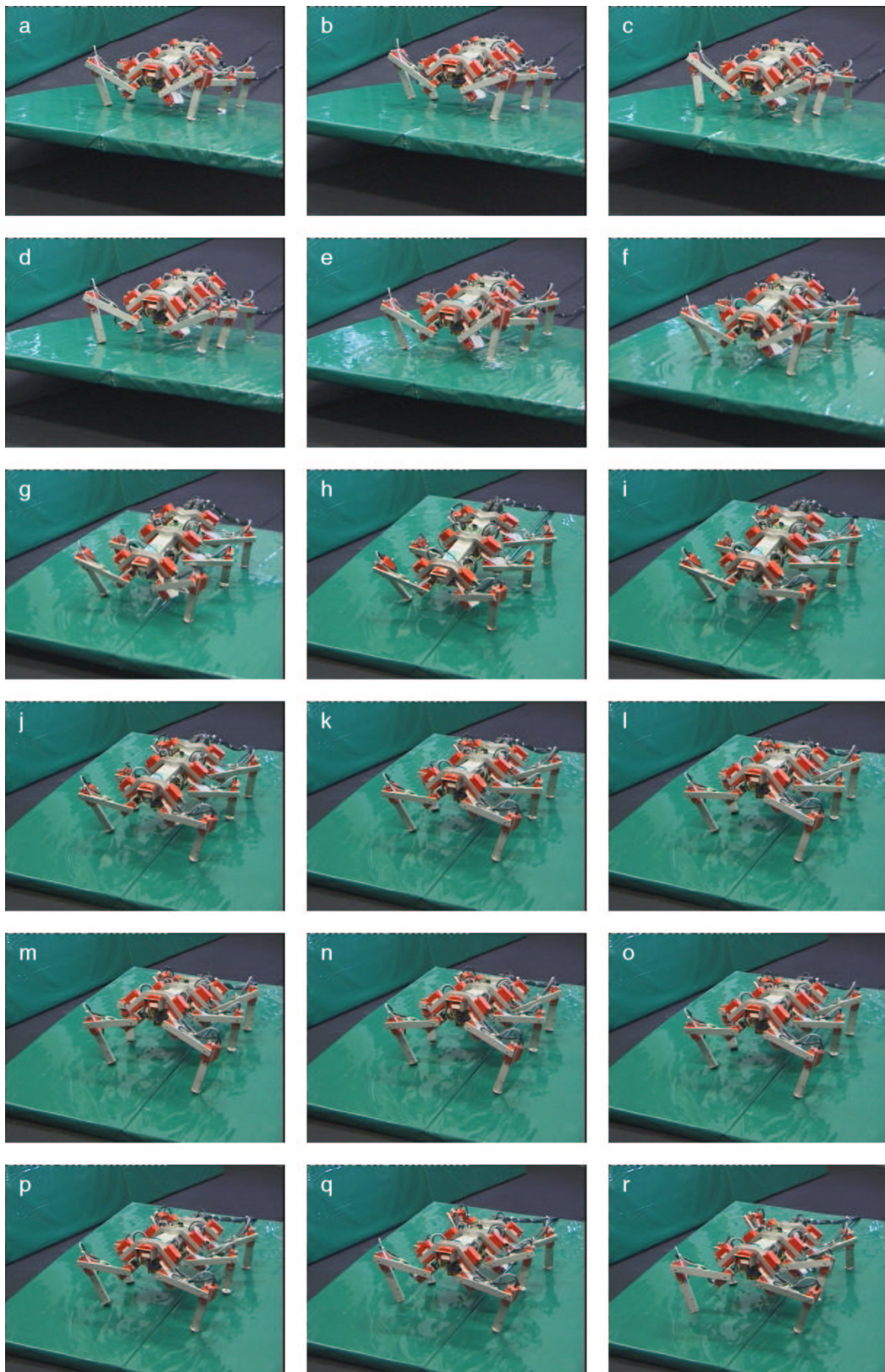


Abbildung 57: Überschreiten einer Wippe



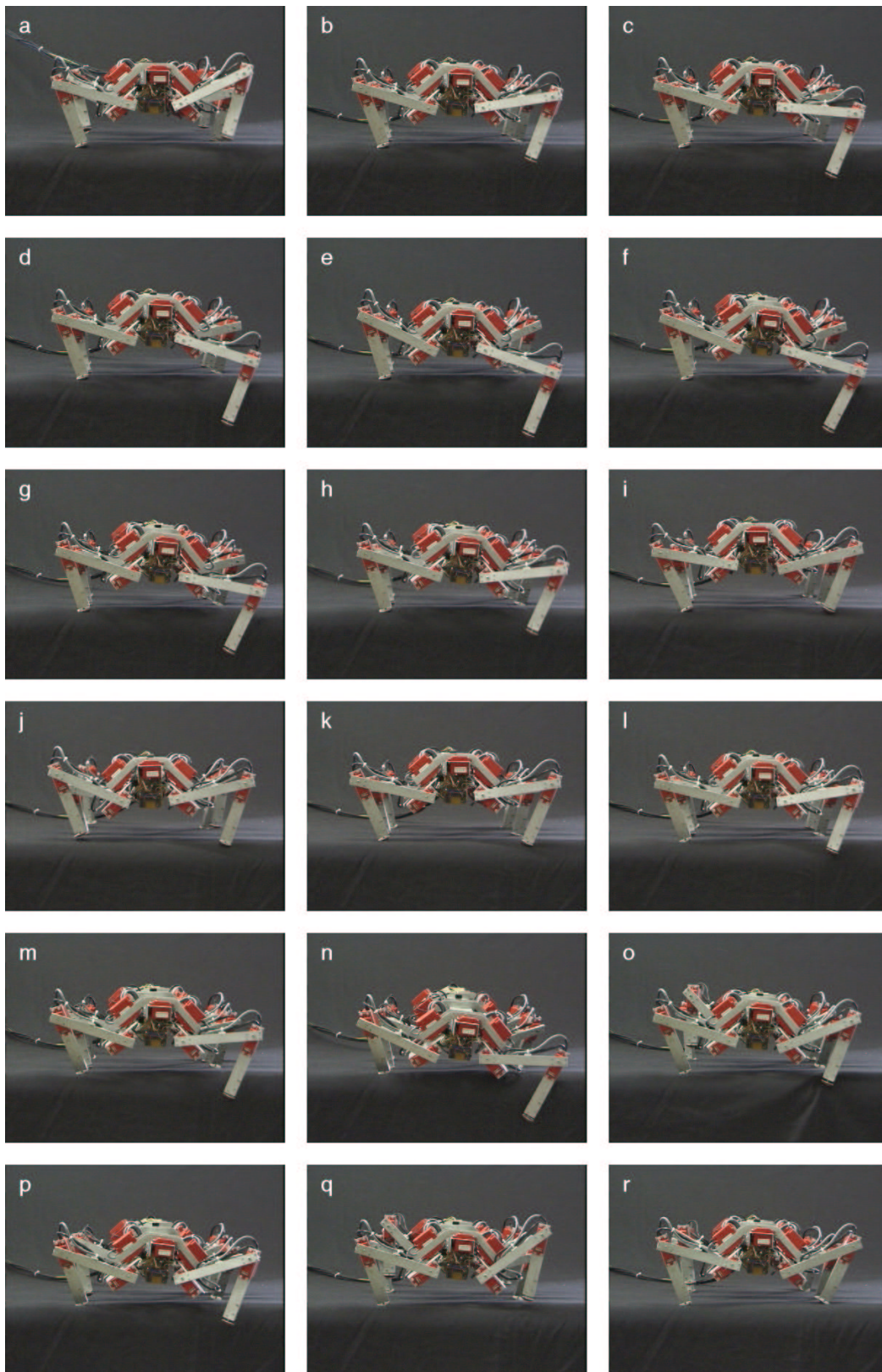


Abbildung 58: Bewegung an einer Kante und Rückzug

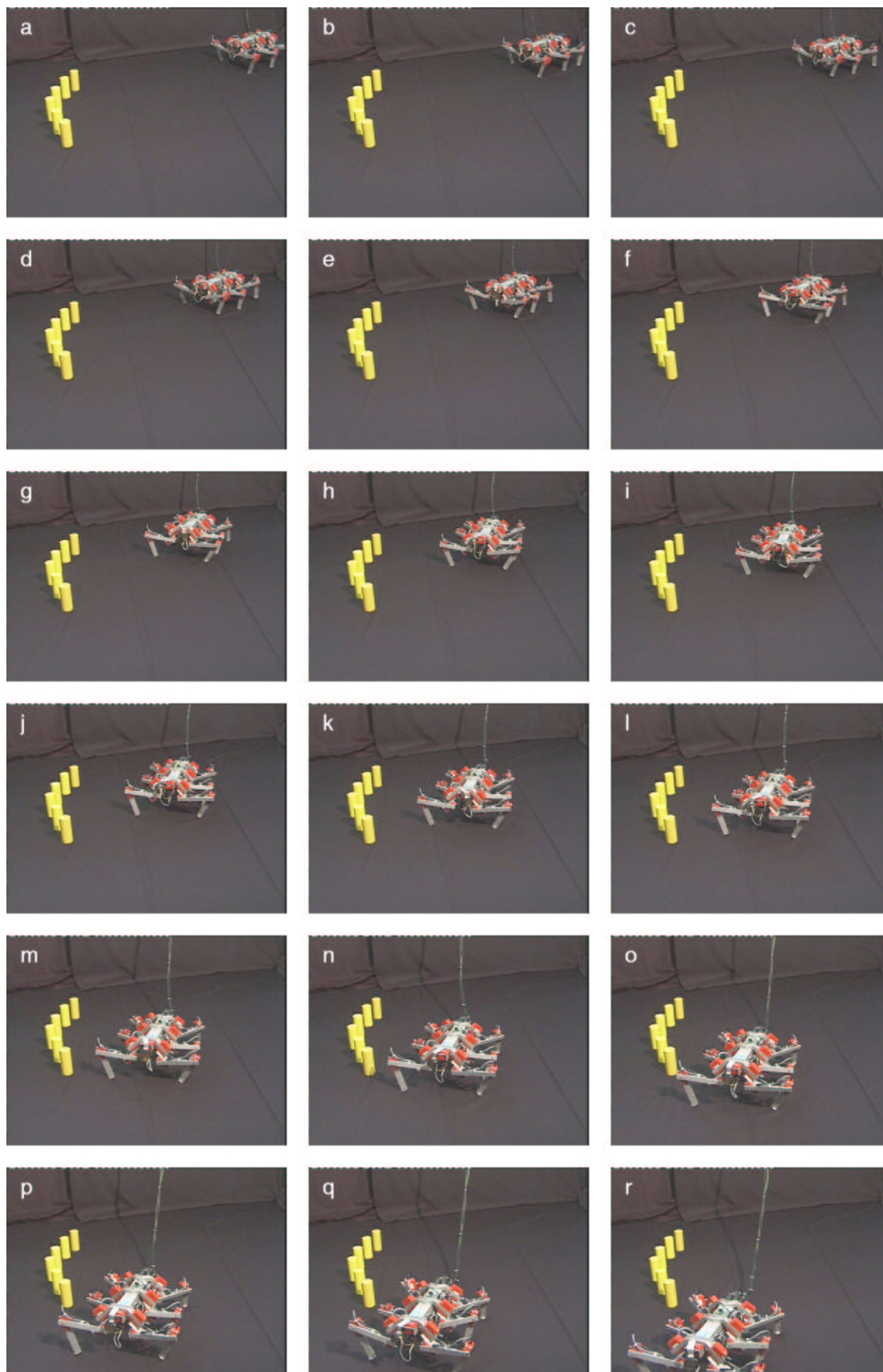


Abbildung 59: Ausweichbewegung vor einer Wand



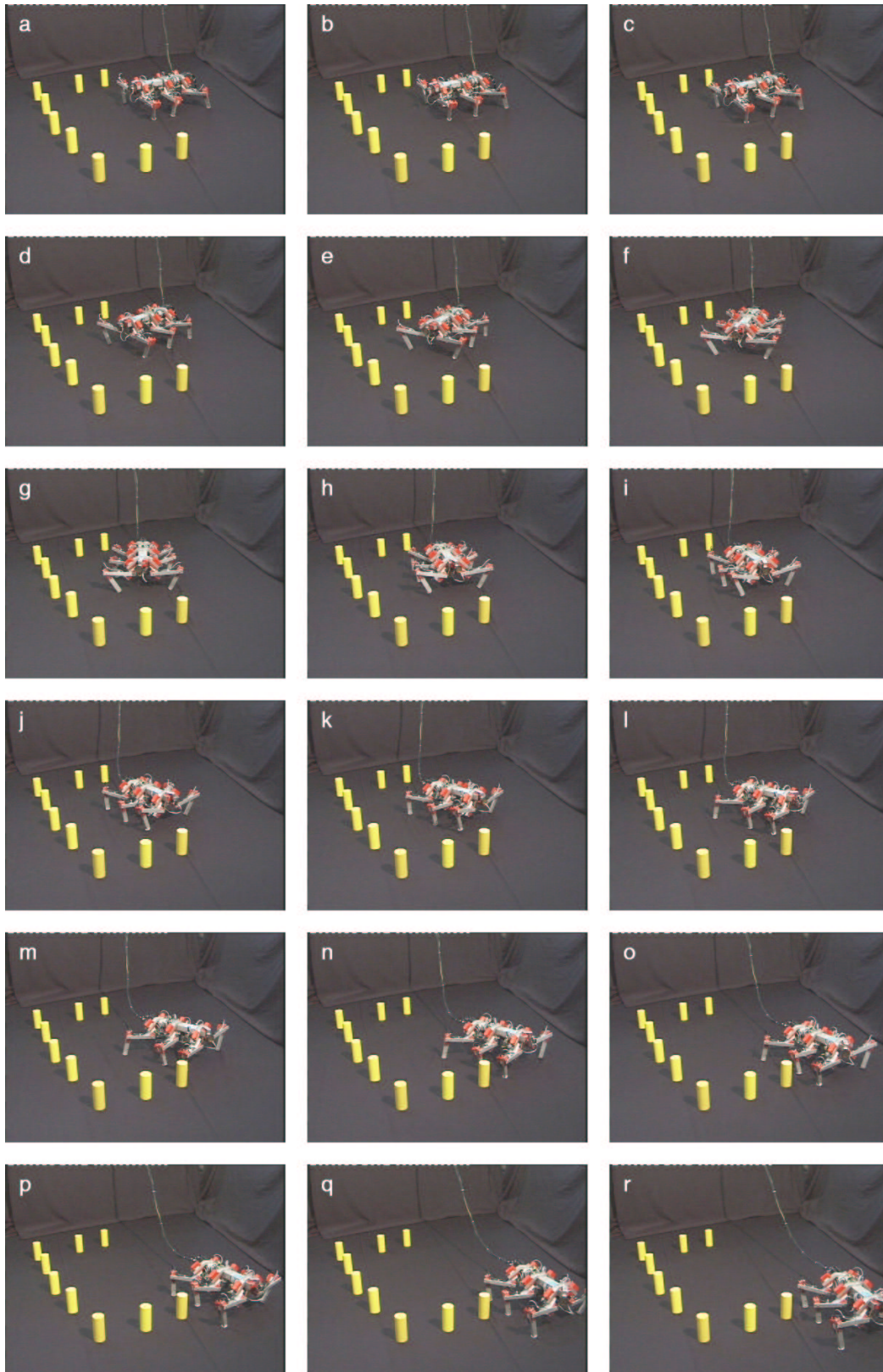


Abbildung 60: Ausweichbewegung in einem Korridor