



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 697 25 764 T2 2004.08.05**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 018 467 B1**

(51) Int Cl.7: **B62D 57/032**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **697 25 764.9**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP97/02581**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 933 021.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 98/004388**

(86) PCT-Anmeldetag: **25.07.1997**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **05.02.1998**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **12.07.2000**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **22.10.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **05.08.2004**

(30) Unionspriorität:  
**21426196 25.07.1996 JP**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**DE, FR, GB**

(73) Patentinhaber:  
**Honda Giken Kogyo K.K., Tokio/Tokyo, JP**

(72) Erfinder:  
**TAKENAKA, Toru, Wako-shi, Saitama 351-01, JP**

(74) Vertreter:  
**Weickmann & Weickmann, 81679 München**

(54) Bezeichnung: **VORRICHTUNG ZUR NACHBILDUNG DES GANGES FÜR EINEN ZWEIBEINIGEN ROBOTOR**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Gangarterzeugungssystem eines auf Beinen beweglichen Roboters und insbesondere ein System, um eine Gangart frei auf Echtzeitbasis zu erzeugen oder zu bestimmen.

[0002] Bei einer herkömmlichen Gangarterzeugung eines auf Beinen beweglichen Roboters, wie sie durch die japanische offengelegte Patentanmeldung Nr. Hei 5 (1993)-285,868 gelehrt wird, werden verschiedene Gangarten in Zeitreihendaten, einschließlich jener zum Geradeauslaufen oder jener zum Drehen, unter Verwendung eines Offline-Computers gestaltet. Die Daten werden dann in einen Speicher eines an dem Roboter angebrachten Mikrocomputers geladen, welcher die Daten nacheinander ausgibt, damit sie während des Gehens verarbeitet werden.

[0003] Ferner schlägt die japanische offengelegte Patentanmeldung Nr. Sho 62 (1987)-97,006 (japanische Patentveröffentlichung Nr. Hei 5 (1993)-62,363) vor, im Vorfeld unter Verwendung eines Offline-Computers ähnliche Zeitreihendaten für Bewegungsmuster vorzubereiten und die Daten in den Speicher des Bordmikrocomputers zu laden, welcher die Daten während des Gehens nacheinander ausgibt, und die benachbarten Zeitreihendaten zu interpolieren, um das Zeitintervall zu verkürzen (d. h. die Abtastrate zu steigern).

[0004] Da die Gangartdaten jedoch im Vorfeld vorbereitet worden sind, bleibt es bei den Techniken gemäß des Standes der Technik aus, eine Gangart während des Laufens frei auf Echtzeitbasis so zu erzeugen, dass der Roboter beispielsweise seinen Schritt oder den Drehwinkel wie gewünscht ändern kann.

[0005] Die US 5,432,417 A offenbart ein Bewegungssteuer/regelsystem für einen zweifüßigen laufenden Roboter, welcher dem Gegenstand der Prämambel des Anspruchs 1 entspricht.

[0006] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein System zum Erzeugen einer Gangart eines auf Beinen beweglichen Roboters gemäß Anspruch 1 bereitgestellt.

[0007] Die bevorzugte Ausführungsform behebt die Nachteile des Standes der Technik und stellt ein Gangarterzeugungssystem eines auf Beinen beweglichen Roboters bereit, welches frei auf Echtzeitbasis und unter Berücksichtigung der Bodenreaktionskraft eine Gangart erzeugt, so dass ein Sollschriff oder ein Sollandrehwinkel etc. realisiert wird.

[0008] Die bevorzugte Ausführungsform behebt die Nachteile des Standes der Technik und stellt ein Gangarterzeugungssystem eines auf Beinen beweglichen Roboters bereit, welches einen Gang frei auf Echtzeitbasis erzeugt, so dass eine Verschiebung und eine (Verschiebungs-) Geschwindigkeit eines Roboterabschnitts an der Grenze (am Übergang) der so erzeugten Gangarten kontinuierlich sind.

[0009] Die bevorzugte Ausführungsform behebt ei-

nen Nachteil des Standes der Technik und stellt ein Gangarterzeugungssystem für einen auf Beinen beweglichen Roboter bereit, welches die Bewegung des Roboters auf Grundlage einer in Echtzeit erzeugten Gangart steuert/regelt.

[0010] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die genäherte Gangart durch Berechnen eines gewichteten Mittelwerts von wenigstens einem der Gangartparameter der ausgewählten Gangarten erzeugen.

[0011] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart unter Verwendung einer Parameterempfindlichkeit eines der Gangartparameter auf einen anderen der Gangartparameter der gewählten Gangart oder Gangarten erzeugen.

[0012] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart durch Berechnen eines gewichteten Mittelwerts von wenigstens einem der Gangartparameter der ausgewählten Gangarten und unter Verwendung einer Parameterempfindlichkeit der ausgewählten Gangart oder Gangarten erzeugen.

[0013] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel Speichermittel enthalten, zum Bestimmen eines Änderungsbetrags eines Parameters relativ zu einem Einheitsänderungsbetrag eines anderen Parameters in wenigstens einer der Standardgangarten als Parameterempfindlichkeit der ausgewählten Gangart und zum Speichern der Parameterempfindlichkeit im Speicher, und die angenäherte Gangart unter Verwendung der gespeicherten Parameterempfindlichkeit erzeugen.

[0014] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel Beschreibungsmittel enthalten, zum Beschreiben einer Beziehung der Störung von einem der Gangartparameter relativ zu dem sich auf die Bodenreaktionskraft beziehenden Kraftparameter in den Standardgangarten, und die angenäherte Gangart auf Grundlage der beschriebenen Beziehung der Störung korrigiert, um Gangarten zu erzeugen, welche die Gangartanforderung in einer solchen Weise erfüllen, dass Verlagerungen oder/und Geschwindigkeiten in den erzeugten Gangarten an einer Grenze der Gangarten kontinuierlich sind.

[0015] Es ist so konfiguriert, dass die Störung des einen der Gangartparameter eine Störung einer horizontalen Körperposition ist.

[0016] Es ist so konfiguriert, dass die Beziehung durch ein lineares Modell beschrieben ist.

[0017] Es ist so konfiguriert, dass die Beziehung durch ein umgekehrtes Pendelmodell beschrieben ist.

[0018] Es ist so konfiguriert, dass die Beziehung durch tabellierte Zeitreihendaten beschrieben ist.

[0019] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart unter Ausschluss des sich auf die Bodenreaktionskraft beziehenden Kraftparameters erzeugt, falls der sich auf die Bodenreaktionskraft beziehende Kraftparameter

unterhalb einer vorbestimmten Bedingung liegt.

[0020] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel Berechnungsmittel für Gelenkwinkelkommandos aufweisen, zum Berechnen eines Gelenkwinkelkommandos des Roboters auf Grundlage der erzeugten Gangart, und Gelenksteuer/regelmittel aufweisen, zum Steuern/Regeln des Gelenks des Roboters in einer solchen Weise, dass er dem berechneten Gelenkwinkelkommando folgt.

[0021] Es ist so konfiguriert, dass die Berechnungsmittel für das Gelenkwinkelkommando Detektionsmittel zum Detektieren eines Zustands des Roboters sowie Korrekturmittel zum Korrigieren einer Position und einer Haltung des Roboters in Antwort auf den detektierten Zustand umfasst und das Gelenkwinkelkommando so berechnet, dass die korrigierte Position und die Haltung bewirkt werden.

[0022] Verschiedene Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden nun, lediglich beispielhaft und unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben, in welchen:

[0023] **Fig. 1** ist eine schematische Ansicht, welche eine Gesamtkonfiguration eines Gangarterzeugungssystems eines auf Beinen beweglichen Roboters gemäß der bevorzugten Ausführungsform zeigt;

[0024] **Fig. 2** ist eine Blockdarstellung, welche Details einer Steuer-/ regleinheit eines in **Fig. 1** illustrierten zweifüßigen Roboters zeigt;

[0025] **Fig. 3** ist eine Blockdarstellung, welche den Betrieb des Gangarterzeugungssystems eines auf Beinen beweglichen Roboters gemäß der bevorzugten Ausführungsform zeigt;

[0026] **Fig. 4** ist ein Hauptflussdiagramm, welches den Betrieb des Gangarterzeugungssystems eines auf Beinen beweglichen Roboters gemäß der bevorzugten Ausführungsform zeigt;

[0027] **Fig. 5** ist eine erläuternde Ansicht, welche die Position und Orientierung des freien Beins in der Standartgangart Nr. 0 aus den bei der in **Fig. 3** und **4** gezeigten Gangarterzeugung verwendeten Standartgangarten zeigt;

[0028] **Fig. 6** ist eine erläuternde Seitenansicht, welche die Fußtrajektorie in der in **Fig. 5** gezeigten Standartgangart Nr. 0 zeigt;

[0029] **Fig. 7** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) in der in **Fig. 5** illustrierten Standartgangart Nr. 0 zeigt;

[0030] **Fig. 8** ist eine erläuternde Ansicht, welche die Position und Orientierung des freien Beins in Standartgangart Nr. 1 zeigt, welche aus den Standartgangarten ausgewählt ist, die in der in **Fig. 3** und **4** gezeigten Gangarterzeugung verwendet werden;

[0031] **Fig. 9** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) in der in **Fig. 8** illustrierten Standartgangart Nr. 1 zeigt;

[0032] **Fig. 10** ist eine erläuternde Ansicht, welche die Position und Orientierung des freien Beins in der Standartgangart Nr. 2, die aus den Standartgangar-

ten ausgewählt ist, die in der in **Fig. 3** und **4** gezeigten Gangarterzeugung verwendet werden, zeigt;

[0033] **Fig. 11** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) in der in **Fig. 10** illustrierten Standartgangart Nr. 2 zeigt;

[0034] **Fig. 12** ist eine erläuternde Ansicht, welche die Position und Orientierung des freien Beins einer angefordbarten Gangart, die in der in **Fig. 3** und **4** gezeigten Gangarterzeugung angefordert worden ist, zeigt;

[0035] **Fig. 13** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) in der in **Fig. 12** illustrierten angeforderten Gangart zeigt;

[0036] **Fig. 14** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartmischens zeigt, auf welche im Flussdiagramm der **Fig. 4** verwiesen wird;

[0037] **Fig. 15** ist eine erläuternde Ansicht, welche die Funktionsweise des Flussdiagramms von **Fig. 14** erläutert;

[0038] **Fig. 16** ist eine erläuternde Ansicht, welche, ähnlich **Fig. 15**, die Funktionsweise des Flussdiagramms von **Fig. 14** erläutert;

[0039] **Fig. 17** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine der Berechnung der momentanen Werte der Sollgangart zeigt, auf die sich im Flussdiagramm von **Fig. 4** bezogen wird;

[0040] **Fig. 18** ist ein Flussdiagramm, welches die zuvor durch den Anmelder vorgeschlagene Zweibein-Ausgleichssteuerung/regelung zeigt, welche auf Grundlage der in der in den **Fig. 3** und **4** gezeigten Gangarterzeugung erzeugten Gangart durchgeführt wird;

[0041] **Fig. 19** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Berechnens einer geänderten Variable der in dem Flussdiagramm von **Fig. 18** illustrierten Zweibein-Ausgleichssteuerung/regelung zeigt;

[0042] **Fig. 20** ist ein Hauptflussdiagramm, welches ähnlich **Fig. 4** ist, jedoch die Funktionsweise des Systems gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0043] **Fig. 21** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartenmischens zeigt, auf welche in dem Flussdiagramm von **Fig. 20** Bezug genommen wird;

[0044] **Fig. 22** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Berechnens von momentanen Werten der Sollgangart zeigt, auf die sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 20** bezogen wird;

[0045] **Fig. 23** ist ein Hauptflussdiagramm, welches ähnlich **Fig. 4** ist, jedoch die Funktionsweise des Systems gemäß einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0046] **Fig. 24** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartenmischens zeigt, auf welche in dem Flussdiagramm von **Fig. 23** Bezug genommen wird;

[0047] **Fig. 25** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine der Berechnung von momentanen Wer-

fen der Sollgangart zeigt, auf welche in dem Flussdiagramm von **Fig. 23** verwiesen wird;

[0048] **Fig. 26** ist ein Hauptflussdiagramm, welches ähnlich **Fig. 4** ist, jedoch die Funktionsweise des Systems gemäß einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0049] **Fig. 27** ist ein Zeitdiagramm, welches die Gangart als Körperposition zeigt, die in der vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erzeugt wird;

[0050] **Fig. 28** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) zeigt, um zu erläutern, wie die Randbedingungen miteinander in Einklang zu bringen sind, auf die sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** bezogen wird;

[0051] **Fig. 29** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) zeigt, um die Funktionsweise zu erläutern, die in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** illustriert ist;

[0052] **Fig. 30** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) zeigt, um auf ähnliche Weise die Funktionsweise zu erläutern, die in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** illustriert ist;

[0053] **Fig. 31** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) zeigt, um auf ähnliche Weise die Funktionsweise zu erläutern, die in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** illustriert ist;

[0054] **Fig. 32** ist ein Zeitdiagramm, welches die Trajektorie des ZMP (in der X-Koordinate oder -richtung) zeigt, um auf ähnliche Weise die Funktionsweise zu erläutern, welche in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** illustriert ist;

[0055] **Fig. 33** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartmischens zeigt, auf welche sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** bezogen wird;

[0056] **Fig. 34** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Berechnens von momentanen Werten einer Sollgangart zeigt, auf die sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** bezogen wird;

[0057] **Fig. 35** ist ein Zeitdiagramm, welches die Gangarten zeigt, die in der in dem Flussdiagramm von **Fig. 26** illustrierten vierten Ausführungsform erzeugt worden sind;

[0058] **Fig. 36** ist ein Hauptflussdiagramm, welches ähnlich **Fig. 4** ist, jedoch die Funktionsweise des Systems gemäß einer fünften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0059] **Fig. 37** ist eine erläuternde Ansicht, welche ein umgekehrtes Pendelmodell zeigt, das in der fünften Ausführungsform verwendet wird;

[0060] **Fig. 38** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartmischens zeigt, auf die sich im Flussdiagramm von **Fig. 36** bezogen wird

[0061] **Fig. 39** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Berechnens von momentanen Werten der Sollgangart zeigt, auf welche sich in dem

Flussdiagramm von **Fig. 36** bezogen wird;

[0062] **Fig. 40** ist ein Hauptflussdiagramm, welches ähnlich **Fig. 4** ist, jedoch die Funktionsweise des Systems gemäß einer sechsten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0063] **Fig. 41** ist ein Zeitdiagramm, welches die Funktionsweise der in **Fig. 40** illustrierten sechsten Ausführungsform zeigt;

[0064] **Fig. 42** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartenmischens zeigt, auf welche sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 40** bezogen wird;

[0065] **Fig. 43** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Berechnens von momentanen Werten der Sollgangart zeigt, auf welche sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 40** bezogen wird;

[0066] **Fig. 44** ist ein Zeitdiagramm, welches die Funktionsweise zeigt, die in dem Flussdiagramm von **Fig. 40** illustriert ist;

[0067] **Fig. 45** ist ein Blockdiagramm, welches ähnlich **Fig. 3** ist, jedoch die Konfiguration und Funktionsweise des Systems gemäß einer siebten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0068] **Fig. 46** ist ein Hauptflussdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der siebten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0069] **Fig. 47** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Gangartmischens zeigt, auf die sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 46** bezogen wird;

[0070] **Fig. 48** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine des Berechnens von momentanen Werten der Sollgangart zeigt, auf die sich in dem Flussdiagramm von **Fig. 46** bezogen wird; und

[0071] **Fig. 49** ist eine erläuternde Ansicht, welche die Körperposition in der Gangart zeigt, die durch das Gangarterzeugungssystem eines auf Beinen beweglichen Roboters gemäß der bevorzugten Ausführungsform erzeugt wurde.

[0072] Das Gangarterzeugungssystem eines auf Beinen beweglichen Roboters gemäß der bevorzugten Ausführungsform wird unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen erläutert. Ein zweifüßiger Roboter wird als Beispiel für einen auf Beinen beweglichen Roboter hergenommen.

[0073] **Fig. 1** ist eine schematische Ansicht, welche eine Gesamtkonfiguration des Systems mit einem zweifüßigen Roboter **1** gemäß der bevorzugten Ausführungsform zeigt.

[0074] Wie in der Figur illustriert ist, weist der Roboter **1** ein Paar lateral im Abstand angeordneter Bein-gelenke **2** auf, welche jeweils aus sechs Gelenken gebildet sind. In einer einfachen Darstellung wird jedes Gelenk durch einen Elektromotor repräsentiert, der das Gelenk betätigt. Die Gelenke umfassen in abwärtiger Richtung nacheinander angeordnet ein Paar Gelenke **10R, 10L** (das rechte Gelenk ist durch R und das linke Gelenk ist durch L bezeichnet) zum Drehen von Beinen in Bezug auf Hüften (ein Paar Gelenke **14R, 14L** zur wiegenden Bewegung in Bezug auf Hüften innerhalb einer frontalen Ebene um eine

X-Achse, ein Paar Gelenke **12R**, **12L** zur anwinkelnden Bewegung in Bezug auf Hüften innerhalb einer Sagittalebene um eine Y-Achse, ein Paar Kniegelenke **16R**, **16L** zur anwinkelnden Bewegung in Bezug auf Knie, ein Paar Gelenke **18R**, **18L** zur anwinkelnden Bewegung in Bezug auf Fußknöchel sowie ein Paar Gelenke **20R**, **20L** zur wiegenden Bewegung in Bezug auf Fußknöchel.

[0075] Der Roboter **1** ist mit Füßen **22R**, **22L** versehen und weist einen Körper (Rumpf) **24** als seinen obersten Abschnitt auf, in welchem eine Steuer/Regeleinheit **26** mit Mikrocomputern untergebracht ist, welche später unter Bezugnahme auf **Fig. 2** beschrieben wird. Die Gelenke **10R(L)**, **12R(L)**, **14R(L)** bilden Hüftgelenke und die Gelenke **18R(L)**, **20R(L)** bilden Fußknöchelgelenke. Die Hüftgelenke und Kniegelenke sind miteinander durch Oberschenkelglieder **28R**, **28L** und die Kniegelenke und Fußknöchelgelenke sind miteinander durch Crus oder Unterschenkelgelenke **30R**, **30L** verbunden.

[0076] Bei der obigen Struktur ist jedem der Beingelenke **2** sechs Freiheitsgrade gegeben. Werden die  $6 \cdot 2 = 12$  Gelenke auf geeignete Winkel gesteuert, während der Roboter **1** geht, so wird die gesamte Beinstruktur in eine gewünschte Bewegung versetzt, und sie bewirken, dass der zweibeinig gehende Roboter **1** willkürlich in einer dreidimensionalen Umgebung geht. (In der Beschreibung repräsentiert „\*“ eine Multiplikation).

[0077] Es soll bemerkt werden, dass in der gesamten Beschreibung die Position und Geschwindigkeit des Körpers **24** verwendet werden, um die Position einer repräsentativen Position wie der Position des Schwerpunkts des Körpers **24** und deren (Verlagerungs-)Geschwindigkeit zu repräsentieren.

[0078] Wie in **Fig. 1** gezeigt ist, ist ein bekannter Sechssachsen-Kraft-Drehmomentsensor **44** unterhalb der Fußknöchelgelenke angeordnet, um damit Komponenten  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  dreier Richtungen einer Kraft und Komponenten  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  dreier Richtungen eines Drehmoments oder Moments zu messen, um zu erfassen, ob der Fuß **22R(L)** aufgesetzt ist oder nicht oder ob eine Belastung oder Kraft über die Fußanordnung auf den Roboter wirkt, wenn er den Boden berührt. Der Körper **24** weist einen Neigungssensor **60** zum Erfassen eines Kippens unter einer Neigung in der frontalen Ebene in Bezug auf eine Z-Achse (in der Richtung der Schwerkraft) und dessen Winkelgeschwindigkeit (Rate) sowie außerdem eines Schwenks in der Sagittalebene in Bezug auf die Z-Achse und dessen Winkelgeschwindigkeit. Die Elektromotoren der jeweiligen Gelenke sind mit jeweiligen Winkelsensoren zum Erfassen einer Winkelverschiebung der Elektromotoren gekoppelt.

[0079] Obwohl dies in **Fig. 1** nicht gezeigt ist, ist der Roboter **1** so konfiguriert, dass er an einer geeigneten Stelle desselben einen Steuerknüppel **62** aufweist, über welchen ein Bediener einer Anforderung zum Wechseln der Gangart zu einer anderen Gangart eingeben kann, um den Roboter etwa beim Gera-

deausgehen zum Drehen zu veranlassen.

[0080] **Fig. 2** ist ein Blockdiagramm, welches die Details der Steuer/Regeleinheit **26** zeigt, die aus Mikrocomputern gebildet ist. Ausgaben des Neigungssensors **60** usw. werden durch einen A/D-Wandler **70** in digitale Signale umgewandelt, welche durch einen Bus **72** zu einem RAM **74** übertragen werden. Ausgabesignale von den Winkelsensoren, welche den jeweiligen Elektromotoren benachbart angeordnet sind, werden durch einen Zähler **76** zu dem RAM **74** übertragen.

[0081] Die Steuer/Regeleinheit **26** enthält einen ersten und zweiten Rechner **80**, **82**, welche CPUs (Zentraleinheiten) enthalten. Der erste Rechner **80** erzeugt frei und auf Echtzeitbasis während des Gehens eine Gangart unter Verwendung von Standardgangarten, welche vorher vorbereitet und in einem ROM **84** gespeichert wurden, berechnet geforderte Gelenkwinkel auf Grundlage der erzeugten Gangart und gibt an den RAM **74** aus. Der zweite Rechner **82** liest die geforderten Gelenkwinkel und erfassten Werte aus dem RAM **74** und gibt über einen D/A-Wandler **86** und einen Servoverstärker veränderte Variable an die Elektromotoren aus, welche an den jeweiligen Gelenken bereitgestellt sind.

[0082] **Fig. 3** ist ein Blockdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der bevorzugten Ausführungsform in funktionaler Weise zeigt, während **Fig. 4** ein Flussdiagramm („strukturiertes Flussdiagramm“ genannt) ist, welches die in dem Blockdiagramm illustrierten Prozeduren des Gangartenmischens oder der Gangarterzeugung zeigen. In der Beschreibung wird die Gangarterzeugung manchmal als „Gangartmischen“ bezeichnet.

[0083] Es wird als erstes die durch das System zu erzeugende Gangart erläutert. Die bevorzugte Ausführungsform hat zum Ziel, ein System bereitzustellen, welches, wie oben erwähnt, eine Gangart auf Echtzeitbasis erzeugt. Genauer hat die bevorzugte Ausführungsform zum Ziel, eine Gangart zu erzeugen, welche zum Durchführen der Haltungsstabilitätssteuerung/regelung des Roboters unter Verwendung der Zweibeinausgleichssteuerung/regelung, die zuvor durch den Anmelder in der japanischen offengelegten Patentanmeldung Nr. Hei 5 (1993)-305,585 vorgeschlagen wurde, nötig ist.

[0084] Um das Verständnis zu erleichtern, wird die zuvor vorgeschlagene Haltungsstabilitätssteuerung/regelung kurz erläutert. Bei der Steuerung/Regelung wird zunächst der Fehler zwischen einem Sollwert und dem erfassten Wert der Bodenreaktionskraft (ZMP) bestimmt und eines der oder beide Beine werden bewegt, um den Fehler zu reduzieren, wodurch Haltungsstabilität bewirkt wird. Ist der Roboter dabei umzukippen, so wird die Soll-Bodenreaktionskraft absichtlich in Abweichung gebracht oder verschoben, um die tatsächliche Bodenreaktionskraft in Abweichung zu bringen oder zu verschieben, wodurch die Haltungsstabilität des Roboters wieder hergestellt wird.

[0085] Bei einem auf Beinen beweglichen Roboter ist es somit unmöglich, ein stabiles Gehen oder Bewegen zu gewährleisten, wenn nicht die Beziehungen zwischen den Soll-Bewegungstrajektorien und dem Soll-Bodenreaktionskraftmuster die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts erfüllen. Ein Erfüllen der Bedingung des dynamischen Gleichgewichts bedeutet, genauer ausgedrückt, dass der Mittelpunkt der Soll-Bodenreaktionskraft (der Punkt der Wirkung auf den Boden, an dem das Sekundärmoment der Soll-Bodenreaktionskraft Null wird) gleich ist dem ZMP (Nullmomentpunkt; dem Punkt auf dem Boden, an dem das Moment der resultierenden Kraft der Trägheitskraft aufgrund von Bewegung und Schwerkraft bis auf seine vertikalen Komponenten Null ergibt). Wenn sie nicht miteinander übereinstimmen, während die Ausgleichssteuerung/regelung arbeitet, verliert der Roboter an dynamischem Gleichgewicht zwischen der resultierenden Kraft und der Bodenreaktionskraft und wird umkippen.

[0086] Bei der zuvor vorgeschlagenen Ausgleichssteuerung/regelung wird dies bewusst ausgenutzt, um Stabilität wieder herzustellen, wenn der Roboter dabei ist zu kippen oder umzufallen. Wie aus dem Vorangehenden verständlich wurde, sollte der auf Beinen bewegliche Roboter als angeforderte Werte bei der Steuerung/Regelung der Bewegung nicht nur das angeforderte Bewegungsmuster, sondern auch das angeforderte Bodenreaktionskraftmuster haben, welches in Bezug auf das angeforderte Bewegungsmuster die Bedingungen des dynamischen Gleichgewichts erfüllt.

[0087] Die geforderte Bodenreaktionskraft wird im Allgemeinen durch einen Wirkungspunkt und durch eine Kraft und ein Moment, die an diesem wirken, beschrieben. Da der Wirkungspunkt auf irgendeinen Punkt gesetzt werden kann, hat die geforderte Bodenreaktionskraft eine Vielzahl von Beschreibungen. Wird jedoch die geforderte Bodenreaktionskraft unter Annahme des zuvor erwähnten Mittelpunkts der geforderten Bodenreaktionskraft als Wirkungspunkt beschrieben, so ist das an diesem Punkt wirkende Moment der resultierenden Kraft bis auf seine vertikale Komponente gleich Null.

[0088] Da, wie oben angegeben, die Trajektorie des Mittelpunkts der geforderten Bodenreaktionskraft, (welche die Bedingungen des dynamischen Gleichgewichts in Bezug auf die geforderten Bewegungstrajektorien erfüllt) gleich dem ZMP ist, kann die geforderte ZMP-Trajektorie anstatt der geforderten Bodenreaktionskraft-Mittelpunktstrajektorie verwendet werden.

[0089] Oben Angegebenes kann daher geschrieben werden als: „Der auf Beinen bewegliche Roboter sollte als geforderte Werte der Steuerung/Regelung der Bewegung nicht nur die geforderten Bewegungsmuster oder Trajektorien, sondern auch die geforderte ZMP-Trajektorie (gefordertes Bodenreaktionskraftmuster) haben“. Basierend auf Vorstehendem wird die Sollgangart in dieser Beschreibung wie folgt defi-

niert:

- a) Die Sollgangart ist im weiteren Sinne ein Satz der Soll-Bewegungstrajektorien und das Soll-Bodenreaktionskraftmuster über eine Periode eines Gehschritts oder eine Periode von Schritten.
- b) Die Sollgangart ist im engeren Sinne ein Satz der Soll-Bewegungstrajektorien und der ZMP-Trajektore für eine Periode eines einzelnen Gehschritts.
- c) Eine Gangserie ist aus einer Serie von Gangarten gebildet.

[0090] Im Folgenden wird zum schnelleren Verständnis die Sollgangart verwendet, um die in dem engeren Sinne definierte Gangart zu repräsentieren, solange nichts Gegenteiliges erwähnt ist. Genauer wird die Sollgangart so verwendet, dass sie eine Gangart für eine Periode bedeutet, welche von dem Anfangszustand einer Zweibein-Unterstützungsphase aus beginnt und bis zum Endzustand einer darauf folgenden Einbeinunterstützungsphase reicht. Es ist nicht notwendig zu erwähnen, dass hierbei die Zweibeinunterstützungsphase eine Periode bedeutet, während der der Roboter **1** sein Gewicht mit zwei Beingelenken **2** unterstützt, während die Einbeinunterstützungsphase eine Periode bedeutet, während der der Roboter sein Gewicht mit einem der zwei Beingelenke **2** unterstützt. Das Bein (Gelenk), welches während der Einbeinunterstützungsphase das Gewicht des Roboters nicht unterstützt, wird als das freie Bein bezeichnet, während das andere als Unterstützungsbein bezeichnet wird.

[0091] Die Aufgabe der bevorzugten Ausführungsform ist es, die oben definierte Sollgangart frei und auf Echtzeitbasis zu erzeugen. Wenn solch eine Gangart frei und auf Echtzeitbasis erzeugt werden kann, so wird es z. B. für einen Bediener möglich, den Roboter **1** per Fernsteuerung zu steuern. Ferner wird es bei der automatischen Steuerung des Roboters möglich, nicht nur den Roboter so zu steuern/regeln, dass er gemäß einer vorbestimmten Abfolge geht, sondern auch den Roboter so zu führen, dass er entlang eines Wegs läuft, oder eine Positionierung mit hoher Präzision zu bewirken.

[0092] Es werden hier die Bedingungen, welche die Sollgangart erfüllen sollte, erläutert.

[0093] Die Bedingungen, welche die Sollgangart erfüllen sollte, werden allgemein in die folgenden fünf Bedingungen klassifiziert.

[0094] Bedingung 1) Die Sollgangart muss die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts erfüllen. Mit anderen Worten sollte die ZMP-Trajektorie, die dynamisch in Antwort auf die Soll-Bewegungstrajektorien des Roboters **1** berechnet werden, mit der Soll-ZMP-Trajektorie übereinstimmen.

[0095] Bedingung 2) Wenn eine Anforderung/Anforderungen wie eine Änderung des Schnitts oder des Drehwinkels durch einen Bewegungsplaner oder Wegplaner (keiner von beiden gezeigt) des Roboters **1** oder durch einen Bediener über den Steuerknüppel

**62** gemacht wird, so sollte die Sollgangart solch eine Anforderung/solche Anforderungen erfüllen.

[0096] Bedingung 3) Die Sollgangart sollte Bedingungen kinematischer Beschränkung erfüllen, wie dass der Roboterfuß sich nicht in den Boden, auf welchem er geht, graben oder auf den Boden, auf welchem er geht, kratzen darf, dass der Gelenkwinkel innerhalb eines bewegbaren Bereichs liegen muss und dass die Gelenkwinkelgeschwindigkeit nicht den erlaubten Bereich überschreiten darf.

[0097] Bedingung 4) Die Sollgangart sollte außerdem Bedingungen dynamischer Beschränkung erfüllen, wie dass der ZMP während der Einbeinunterstützungsphase innerhalb der Fußsohle-Boden-Kontaktfläche bleiben muss und dass das Gelenkdrehmoment nicht die mögliche maximale Leistung des Gelenkbetätigers überschreiten darf.

[0098] Bedingung 5) Die Sollgangart sollte Randbedingungen erfüllen. Als selbstverständliche Tatsache resultiert Bedingung 1 in der Randbedingung, dass die Position und Geschwindigkeit von Roboterpositionen wie dem Körper an der Gangartgrenze (Gangartübergang) kontinuierlich sein müssen. (Wenn nicht, dann würden unendliche Kräfte auftreten oder der ZMP würde sich fern von der Fußsohle-Boden-Kontaktfläche bewegen).

[0099] Genauer sollte der Endzustand der n-ten Gangart dem Anfangszustand der n + 1-ten Gangart entsprechen, und zwar insbesondere in Bezug auf die Körperposition, -orientierung und -geschwindigkeit relativ zur Fußposition und -orientierung. Genauer ist es ausreichend, wenn dann, wenn der Ausgangszustand der n + 1-ten Gangart bereits bestimmt ist, der Endzustand der n-ten Gangart mit dem Ausgangszustand der n + 1-ten Gangart in Einklang gebracht wird.

[0100] Falls nicht bestimmt, so ist es ausreichend, wenn der Endzustand der n + 1-ten Gangart innerhalb eines Bereichs liegt, welcher ein kontinuierliches Gehen ohne Verlust von Haltungsvermögen sicherstellt. Wie später diskutiert werden wird, ist es jedoch ziemlich schwierig, einen Bereich für den Endzustand zu bestimmen, der ein kontinuierliches Gehen ohne Verlust an Haltungsvermögen sicherstellt.

[0101] Allgemein gesagt wird die Sollgangart durch einen Gangarterzeugungsalgorithmus mit Parameterwerten oder in tabellierten Zeitreihendaten, wie den später beschriebenen Standard-Gangarten, erzeugt. (Mit anderen Worten bedeutet das Bestimmen der Gangart das Bestimmen der Parameterwerte oder tabellierten Zeitreihen-Daten auf geeignete Weise.)

[0102] Es können durch Veränderung der Parameterwerte oder tabellierten Zeitreihendaten verschiedene Gangarten erzeugt werden. Werden die Parameter oder tabellierten Zeitreihendaten jedoch ohne vorsichtige Inachtnahme bestimmt, so ist es ungewiss, ob die erzeugte Gangart alle der oben erwähnten Bedingungen erfüllen kann.

[0103] Insbesondere ist es beim Erzeugen der Be-

dingung 1) erfüllenden Körpertrajektorien auf Grundlage der ZMP-Trajektorie durch einen Gangarterzeugungsalgorithmus selbst dann, wenn die für ein kontinuierliches Gehen geeigneten Bereiche der Körperposition und -geschwindigkeit am Ende des Gangs oder beim Endzustand bekannt sind, schwierig, die sich auf die ZMP-Trajektorie beziehenden Parameter so zu bestimmen, dass sowohl die Körperposition als auch -geschwindigkeit in den Bereich am Ende des Gangs fallen.

[0104] Die Gründe für diese Schwierigkeit sind wie folgt.

[0105] Grund 1) Der Roboterkörper tendiert dazu, sich weiter von dem ZMP weg zu bewegen, wenn er sich einmal anfänglich von dem ZMP weg bewegt hat. Dies wird unter Verwendung eines umgekehrten Pendelmodells erläutert, welches dem Verhalten des Roboterkörpers angenähert ist.

[0106] Der Unterstützungspunkt des umgekehrten Pendels weicht von dem Projektionspunkt des auf dem Boden projizierten Schwerpunkts des Pendels ab, wobei die Abweichung dazu tendiert, größer zu werden und das Pendel umfällt. Selbst wenn das Pendel umfällt, wirkt die resultierende Kraft aus der Trägheitskraft und Schwerkraft des umgekehrten Pendels auf den Unterstützungspunkt (mit anderen Worten der ZMP wird gleich dem Unterstützungspunkt gehalten) und die resultierende Kraft wird in Balance mit der Bodenreaktionskraft gehalten, die über dem Unterstützungspunkt wirkt. Die dynamische Gleichgewichtsbedingung beschreibt kaum eine momentane Beziehung zwischen der Trägheitskraft und Schwerkraft und der Bodenreaktionskraft eines bewegten Objekts.

[0107] Es ist ein häufiges Missverständnis, dass ein kontinuierlicher Robotergang sichergestellt werden kann, wenn die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts erfüllt ist. Die Erfüllung der Bedingungen des dynamischen Gleichgewichts stellt jedoch nicht sicher, dass der Roboter während des Gehens nicht eine stabile Haltung verliert. Gerade wenn der Schwerpunkt des umgekehrten Pendels dazu tendiert, sich weiter weg zu bewegen, wenn er von der Position direkt unterhalb des Unterstützungspunkts bewegt ist, so tendiert der Schwerpunkt des Roboters dann, wenn er sich einmal von der Position direkt oberhalb des ZMP bewegt hat, dazu, sich von diesem weiter weg zu bewegen.

[0108] Grund 2) Für die Einbeinunterstützungsphase ist es nötig, dass der ZMP sich in der Fußsohle-Boden-Kontaktfläche des Unterstützungsbeins befindet. Aufgrund starrer Begrenzungsbedingungen wie dieser ist es schwierig, die Körperbeschleunigungs- und Verzögerungsmuster zu bestimmen. Werden die Körpermuster bestimmt, indem hauptsächlich die Körperposition berücksichtigt wird, so würde die Geschwindigkeit am Ende des Gangs dazu tendieren, außerhalb des Bereichs zu liegen und umgekehrt. Eine Analogie beim Führen eines Fahrzeugs ist es, das Fahrzeug an einer vorbestimmten Anhal-

teposition zu einer vorgegebenen Zeit zu stoppen, wobei die Bremskraft auf einen schmalen vorgegebenen Bereich begrenzt ist.

[0109] Es war somit bislang schwierig, die Sollgangparameter oder tabellierten Daten, welche alle der möglichen Gangartbedingungen erfüllen, auf Echtzeitbasis zu erzeugen oder bestimmen. Die vorher genannten, in den Bezugsquellen beschriebenen Techniken des Standes der Technik konnten daher keinen freien Robotergang bewirken.

[0110] Auf Grundlage des oben Erwähnten wird das System gemäß der vorliegenden Erfindung unter Bezugnahme auf **Fig. 3** erläutert. Die Figur, ein Blockdiagramm, zeigt das System in einer funktionellen Weise, so dass das Verständnis der Funktionsweise des in **Fig. 4** illustrierten Systems erleichtert wird.

[0111] In dem illustrierten System wird die Gangart/werden die Gangarten in einem Erzeuger für Mischgangart-Momentanwerte auf der Grundlage eines Satzes oder einer Gruppe von Standardgangarten (welche auf einem Offline-Computer erzeugt wurden und in dem ROM **84** gespeichert wurden) in einer solchen Weise erzeugt, dass die erzeugte Gangart eine Gangartanforderung (wie zum Wechseln von Gangarten) erfüllt, die während des Gehens auf Echtzeitbasis erstellt wurde.

[0112] Die Standardgangarten wurden durch einen Offline-Computer durch Auswählen von Gangarten über Versuch-und-Fehler vorbereitet, was eine lange kontinuierliche Gehperiode bis zum letzten Schritt sicherstellt, ohne ein Abweichen der Roboterkörpertrajektorie zu verursachen, und wurden in dem ROM **84** gespeichert. Die Standardgangarten, welche eine lange kontinuierliche Gehperiode sicherstellen, sind typischerweise aus einer Serie von Gangarten gebildet mit einer Gangart zum Beginnen des Gehens aus einer Standstellung, einer Gangart zum Beschleunigen der Gehgeschwindigkeit, einer Gangart für ein Gehen mit konstanter Geschwindigkeit, einer Gangart zum Verzögern der Gehgeschwindigkeit sowie einer Gangart zum Stoppen des Gehens.

[0113] Die Gangart wird durch Gangartparameter beschrieben. Die Gangartparameter umfassen Bewegungsparameter und den ZMP-Parameter (allgemeiner Bodenreaktionskraftparameter). Der „Bodenreaktionskraftparameter“ wird in dieser Beschreibung verwendet, um einen Parameter zu bezeichnen, der sich auf das Bodenreaktionskraftmuster in Bezug zur Zeit bezieht.

[0114] Die ZMP-Trajektorie weist ein Zickzackmuster auf und der ZMP-Parameter wird in den Koordinaten X, Y und Z (Richtungen) durch Positionen der Bremspunkte und Passierzeiten beschrieben, wie in **Fig. 7** gezeigt. Auf dem ZPM wird sich nur in der X-Koordinate bezogen). In dem Erzeuger für Mischgangartmomentanwerte werden momentane Werte des ZMP (Trajektorie), d. h. Werte bei aktuellen (zur aktuellen Zeit) Steuer/Regelzyklen in einem ZMP-Erzeuger auf Grundlage der ZMP-Parameter berechnet.

[0115] Die Bewegungsparameter umfassen Fuß-(Trajektonen) Parameter und die Körper-(Trajektorien) Parameter.

[0116] Die Fußtrajektorienparameter sind gebildet aus der Startposition und -orientierung des freien Beins (Fußanheben) Endposition und -orientierung des freien Beins (Fußaufsetzen) und den Perioden oder Zeiten der Zweibeinunterstützungsphase und der Einbeinunterstützungsphase usw..

[0117] Auf dieser Grundlage werden momentane Werte der Positionen ( $x_f$ ,  $y_f$ ,  $z_f$ ) und Orientierungen ( $\Theta_{xf}$ ,  $\Theta_{yf}$ ,  $\Theta_{zf}$ ) beider Füße durch einen Fußtrajektorienparameter bestimmt, und zwar gemäß der Technik, welche zuvor durch den Anmelder in der japanischen offengelegten Patentanmeldung Hei 5 (1993)-318,339 und Hei 5 (1993)-324, 115 vorgeschlagen wurde. Das Wort „Orientierung“ bedeutet hier Neigung oder Richtung im Raum.

[0118] Die Körpertrajektonenparameter enthalten Parameter, welche die Körperorientierung (die Richtung oder Neigung des Körpers **24** im Raum), die Körperhöhe (einen Wert in der Z-Richtung), Ausgangsposition (Verlagerung) und -geschwindigkeit des Körpers usw. definieren.

[0119] Auf Grundlage der die Körperposition und -Orientierung bestimmenden Parameter werden momentane Werte der horizontalen Position ( $x_b$ ,  $y_b$ ) und Orientierung ( $\Theta_{xb}$ ,  $\Theta_{yb}$ ,  $\Theta_{zb}$ ) des Körpers erzeugt, und zwar in einem Erzeuger für horizontale Körperposition gemäß Zeitfunktionen oder der Technik, welche zuvor durch den Anmelder in der japanischen offengelegten Patentanmeldung Hei 5 (1993)-324,115 vorgeschlagen wurde. Wie zuvor erwähnt, ist die Körperposition die Position des repräsentativen Punkts wie dem Massezentrum des Körpers **24**. Die Höhe des Körpers  $z_b$  wird in einem Körperhöhenermittler bestimmt, und zwar unter Verwendung einer geeigneten Technik wie der, welche in einer durch den Anmelder am selben Datum wie die vorliegende Erfindung eingereichten Patentanmeldung beschrieben ist.

[0120] Da der auf Beinen bewegliche Roboter **1**, wie in **Fig. 1** illustriert, **12** Gelenke aufweist, werden Gelenkwinkel deterministisch durch eine inverse kinematische Lösung aus den efialtenen Fußpositionen und -orientierungen sowie der Körperposition und -orientierung berechnet. Genau wird nur die aktuelle Sollhaltung Roboters bestimmt. (Präziser sind die Sollfußpositionen und -orientierungen Gegenstand einer Korrektur in einem Zweibeinausgleichssteuerer/regler und auf Grundlage der korrigierten Werte (falls korrigiert) werden die Sollgelenkwinkel berechnet.)

[0121] Die Gangarten werden durch die Gangartparameter deterministisch beschrieben. Um den Umfang der Berechnung zu reduzieren, wurden bei dieser Ausführungsform jedoch Standardgangart-Körpertrajektorien vorher durch einen Offline-Computer als in einem Speicher zu speichernde tabellierte Zeitreihendaten vorbereitet, wodurch dem Steuer/regler

zyklus zugeordnete Daten nacheinander ausgegeben werden. Ist die Kapazität des ROMs **480** relativ gering, so ist es alternativ möglich, die Standardgangart-Körpertrajektorien unter Verwendung eines Polynoms anzunähern, Koeffizienten des Polynoms werden im Speicher als eine Art Gangartparameter gespeichert, obwohl dies zu einem geringen Annäherungsfehler führt.

[0122] Im Folgenden werden die Standardgangarten weiter erläutert. Die Standardgangarten werden in dieser Beschreibung als Zeitfunktionen beschrieben. Jede Standardgangart wird durch einen Satz  $g(t)$  und  $f(t)$  beschrieben, welche wie folgt definiert sind.

$g(t)$ : Funktionen, welche die Bewegung des Roboters beschreiben. (Genauer repräsentieren die Funktionen die Positionen und Orientierungen der Roboterkomponenten zur Zeit  $t$ , und genauer wird die Bewegung des Roboters durch die Positionen und Orientierungen des Roboterkörpers und der Roboterfüße beschrieben, wie in **Fig. 3** gezeigt ist);

$f(t)$ : Funktionen, welche die ZMP-Trajektorie beschreiben. Genauer repräsentieren die Funktionen, wie oben erwähnt, die Positionen ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) des ZMPs zur Zeit  $t$ .

[0123] Die Gangartfunktionen werden durch Symbole im Hinblick auf die Parameter beschrieben.

[0124] Genauer gesagt sind  $g(t)$  und  $f(t)$  Funktionen, welche durch die Gangartparameter definiert sind. Obwohl bevorzugt wird, dass alle Parameter repräsentiert werden, um Gangarten deutlich auszuweisen, werden nur die für die folgende Beschreibung notwendigen Parameter hier beschrieben, da die Anzahl von Parametern groß ist.

$g(t: a, b, c, d, x(k), y(k))$ : Funktionen, welche Roboterbewegungstrajektorien beschreiben;

$f(t: a, b, c, d)$ : Funktionen, welche die ZMP-Trajektorie beschreiben (Funktionen, welche die Bodenreaktionskraft beschreiben).

wobei:

a: Anfangsorientierung des Fußes des freien Beins (zeigt den Drehwinkel des Roboters an)

b: Anfangspositionen des Fußes des freien Beins in der Vor-und-Rück-Richtung (Gehschritt)

c: die X-Koordinate des ZMP in der Einbeinunterstützungsphase

d: die Y-Koordinate des ZMP in der Einbeinunterstützungsphase

$x(k)$ : die X-Koordinate von Körperpositionen in Zeitreihen

$y(k)$ : die Y-Koordinate von Körperpositionen in Zeitreihen.

[0125] In der Darstellung werden die Zeitreihendaten als eine Art Parameter behandelt. Damit einhergehend wird ohne eine die Körperposition beschreibende Zeitreihentabelle die Gangart ausschließlich oder deterministisch bestimmt, wenn die Parameter der Anfangskörperposition und -geschwindigkeit gegeben sind. Die Zeitreihendaten der Körperposition sind somit redundant. Um jedoch die Gangarterzeugungszeit auf einer Echtzeitbasis zu verkürzen, wird

jedoch die Zeitreihentabelle der Körperposition hier als eine Art Parameter behandelt, welche Gangarten beschreiben.

[0126] In dieser Ausführungsform sind die Anfangskörperpositions- und -geschwindigkeitsparameter für verschiedene Gangarten unterschiedlich. Da jedoch die Anfangskörperposition und -geschwindigkeit berechnet werden kann, wenn die Zeitreihendaten der Körperposition explizit beschrieben sind, wird hier keine weitere Erläuterung gegeben.

[0127] In der Ausführungsform werden die Standardgangarten wie die zum Beginnen des Gehens aus der Standposition heraus, wie oben erwähnt, unter Verwendung eines Offline-Computers vorbereitet. Die folgenden drei Gangarten sind Beispiele.

#### Standartgangart Nr. 0

$g(t: a_0, b_0, c_0, d_0, x_0(k), y_0(k))$

$f(t: a_0, b_0, c_0, d_0)$

#### Standartgangart Nr. 1

$g(t: a_1, b_0, c_1, d_1, x_1(k), y_1(k))$

$f(t: a_1, b_0, c_1, d_1)$

#### Standartgangart Nr. 2

$g(t: a_0, b_2, c_2, d_2, y_2(k), y_2(k))$

$f(t: a_0, b_2, c_2, d_2)$

[0128] **Fig. 5** bis **11** illustrieren die Anfangspositionen und -orientierungen des Fußes des freien Beins und die Endpositionen und -orientierungen des Fußes des freien Beins usw. Um die Gangarten zu beschreiben, wird das Koordinatensystem mit einem Bezugspunkt auf der Fußsohle-Boden-Kontaktfläche des Unterstützungsbeins als Ursprung und die Vor-und-Rück-Richtung des Fußes des Unterstützungsbeins als X-Richtung und die Links-Rechts-Richtung als die Y-Richtung gesetzt.

[0129] Bevor mit der Erläuterung des Flussdiagramms von **Fig. 4** begonnen wird, soll angenommen werden, dass die Gangartanforderung so wie in **Fig. 12** und **13** gezeigt, gegeben ist und die Funktionsweise des Systems wird unter Verwendung der Erzeugung der angeforderten Gangart (der vorgeannten angenäherten Gangart, auf die sich im Folgenden mit „dritte Gangart“ bezogen wird) zum Erfüllen der Anforderung mithilfe der Standardgangarten als Beispiel erläutert. Der angeforderten Gangart sollte eine Anfangsorientierung  $a_3$  und eine Vor- und Rückposition  $b_3$  des freien Beins gegeben werden.

[0130] In der dritten Gangart ist der Parameter  $\underline{a}$  offenbar  $a_3$  und der Parameter  $\underline{b}$  ist offenbar  $b_3$ . Das Problem ist nun die Bestimmung der anderen Parameter  $c$ ,  $d$  und der tabellierten Werte  $x(k)$ ,  $y(k)$ , so dass die Anforderung erfüllt wird.

[0131] Die dritte Gangart wird daher wie folgt beschrieben;

$g(t: a_3, b_3, c_3, d_3, x_3(k), y_3(k))$

$f(t: a_3, b_3, c_3, d_3)$ .

[0132] Es werden dann die Parameter  $c_3, d_3$  und die tabellierten Zeitreihendaten  $x_3(k)$  und  $y_3(k)$  bestimmt.

[0133] Es werden hier die Fachbegriffe definiert. Die Parameter  $a, b$  enthalten Werte, welche als Gesuch (gleich der vorher erwähnten Gangartanforderung) von außerhalb des Systems (wie durch einen Bediener mittels des Steuerknüppels **62**) oder durch ein anderes System (wie von dem Zweibeinausgleichssteuerer/regler im Blockdiagramm von **Fig. 3**) eingegeben wurden. Der Parameter, dessen Wert direkt als ein bestimmter Wert gefordert wird, wird als „direkt bestimmter Parameter“ bezeichnet.

[0134] Um die Erklärung zu vereinfachen wird in dieser Ausführungsform beschrieben, dass nur die Anfangsorientierung des Fußes des freien Beins und die Vor-und-Rück-Position (Schritt) nach Belieben geändert werden kann. Zusätzlich können die folgenden 1) und 2), wie oben erwähnt, als die Gangartanforderung eingegeben werden. Ferner kann auch 3) eingegeben werden, was in der vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung erwähnt werden wird.

1) Anweisungen von einem Bediener (z. B. Anweisungen bezüglich des Drehwinkels oder der Drehwinkelgeschwindigkeit oder Bewegungsgeschwindigkeit)

2) Anforderung von einem anderen System wie einem Wegleitsystem, falls vorhanden (z. B. Endposition und -orientierung des Fußes des freien Beins)

3) Randbedingungen von Gangarten zwischen der aktuellen Gangart und der vorhergehenden oder nächsten Gangart (z. B. Anfangsposition und -orientierung des Körpers, Anfangsposition und -orientierung des Fußes des freien Beins).

[0135] Andererseits werden Parameter wie  $c, d$  oder die tabellierten Daten  $x(k), y(k)$  abhängige Parameter (oder tabellierte Daten) genannt, welche auf Grundlage der direkt bestimmten Parameter bestimmt werden, so dass sie die Gangartbedingungen erfüllen. Da es ziemlich schwierig ist, die tabellierten Zeitreihendaten direkt zu bestimmen, sind die tabellierten Zeitreihendaten selten direkt bestimmte Parameter.

[0136] Die zuvor erwähnten Standardgangarten Nr. 1 oder Nr. 2 (andere als die Standardgangart Nr. 0) basieren auf der Standardgangart Nr. 0 und nur einer der direkt bestimmten Parameter (d. h.  $a$  oder  $b$ ) unterscheidet sich von dem der Standardgangart Nr. 0. Die Grundgangart unter den ausgewählten Standardgangarten (d. h. Standardgangart Nr. 0) wird als die Basisgangart bezeichnet.

[0137] Die Bestimmung der Parameter der angeforderten Gangart (die Parameter der angeforderten Gangart werden in dieser Bezeichnung manchmal als „gemischte Parameter“ bezeichnet) wird erläutert. Die abhängigen Parameter  $c_3, d_3$  und die abhängi-

gen tabellierten Daten  $x_3(k), y_3(k)$  variieren in Antwort auf die direkt bestimmten Parameter  $a, b$ , so dass sie die Bedingungen einer Gangart erfüllen. Zudem wird vorgeschlagen, dass sie kontinuierlich in Antwort auf die Änderung der Parameter  $a, b$  variieren. Die Werte sind daher kontinuierliche Funktionen der Parameter  $a, b$ . Das bedeutet, dass das folgende Annäherungsprinzip genutzt oder angewendet werden kann. Mit anderen Worten können die Parameter der angeforderten Gangart durch ein Näherungsverfahren berechnet werden.

[0138] Genauer gesagt, wenn eine Funktion  $p$  eine kontinuierliche Funktion ist, so kann sie mit dem folgenden Ausdruck angenähert werden.

[0139]

$$P(a_0 + \Delta a, b_0 + \Delta b) = P(a_0, b_0) + \delta P/\delta a|_{(a = a_0, b = b_0)} \Delta a + \delta P/\delta b|_{(a = a_0, b = b_0)} \Delta b \quad \text{Näherung 1}$$

wobei hier,

$\delta P/\delta a|_{(a = a_0, b = b_0)}$  ein partielles Differenzial von  $P$  bezüglich  $a$  bei  $a = a_0, b = b_0$  ist;

$\delta P/\delta b|_{(a = a_0, b = b_0)}$  ein partielles Differenzial von  $P$  bezüglich  $b$  bei  $a = a_0, b = b_0$  ist.

[0140] Ferner kann, da

$$\delta P/\delta a|_{(a = a_0, b = b_0)} = (P(a_0 + \Delta a_1, b_0) - P(a_0, b_0))/\Delta a_1$$

$$\delta P/\delta b|_{(a = a_0, b = b_0)} = (P(a_0, b_0 + \Delta b_2) - P(a_0, b_0))/\Delta b_2$$

[0141] Näherung 1 wie folgt neu geschrieben werden.

[0142]

$$P(a_0 + \Delta a, b_0 + \Delta b) = P(a_0, b_0) + \{P(a_0 + \Delta a_1, b_0) - P(a_0, b_0)\}/\Delta a_1 \Delta a + \{P(a_0, b_0 + \Delta b_2) - P(a_0, b_0)\}/\Delta b_2 \Delta b \quad \text{Näherung 2}$$

[0143] Die erste Ausführungsform ist eine Entwicklung von Näherung 2 und die zweite Ausführungsform (später beschreiben) ist eine Entwicklung von Näherung 1.

[0144] Die Erläuterung der Parameter der angeforderten Gangart wird fortgesetzt. Die Parameter der dritten Gangart werden aus den Standardgangarten durch internes oder externes Teilen (d. h. Interpolieren) aller abhängigen Parameter und tabellierten Zeitreihendaten unter Verwendung der folgenden Gleichungen berechnet. Dies liegt daran, dass in Betracht gezogen werden kann, dass die abhängigen Parameter im Verhältnis zu den direkt bestimmten Parametern stehen.

[0145] Liegt  $a_3$  zwischen  $a_1$  und  $a_2$ , so wird es durch interne Division berechnet und liegt  $a_3$  nicht zwischen  $a_1$  und  $a_2$ , so wird es durch externe Division erhalten. Wenn der Unterschied des Parameters im dynamischen Sinne vernachlässigt werden kann, so kann der Parameter derselbe sein wie der der Ba-

sisgangart. Werden die tabellierten Zeitreihendaten in den ersten Rechner **80** zu einer Zeit berechnet, so wird die Rechenbelastung groß. Die interne oder externe Division sollte dementsprechend nur für Daten in dem aktuellen Steuer/regelzyklus ausgeführt werden.

[0146] Es folgen die zuvor erwähnten Gleichungen zum Mischen (später als „Gleichung 1“ bezeichnet), welche interne oder externe Divisionen verwenden.

$$c3 = c0 + (c1 - c0) * (a3 - a0) / (a1 - a0) + (c2 - c0) * (b3 - b0) / (b2 - b0)$$

$$d3 = d0 + (d1 - d0) * (a3 - a0) / (a1 - a0) + (d2 - d0) * (b3 - b0) / (b2 - b0)$$

$$x3(k) = x0(k) + (x1(k) - x0(k)) * (a3 - a0) / (a1 - a0) + (x2(k) - x0(k)) * (b3 - b0) / (b2 - b0)$$

$$y3(k) = y0(k) + (y1(k) - y0(k)) * (a3 - a0) / (a1 - a0) + (y2(k) - y0(k)) * (b3 - b0) / (b2 - b0)$$

[0147] Diese Gleichung 1 sind gewichtete Mittelwertberechnungen der Standartparameter und tabellierten Daten. Beispielsweise kann die Gleichung zum Erhalten von c3 wie folgt neu geschrieben werden.

$$c3 = \{1 - (a3 - a0) / (a1 - a0) - (b3 - b0) / (b2 - b0)\} * c0 + (a3 - a0) / (a1 - a0) * c1 + (b3 - b0) / (b2 - b0) * c2.$$

[0148] Da die Summe der gewichteten Koeffizienten von c0, c1, c2 gleich 1 ist, ist c3 ein gewichteter Mittelwert, dessen Wichtungen von c0, c1 und c2 jeweils

$$\{1 - (a3 - a0) / (a1 - a0) - (b3 - b0) / (b2 - b0)\}$$

$$(a3 - a0) / (a1 - a0)$$

$$(b3 - b0) / (b2 - b0)$$

betragen.

[0149] Wenn die Endposition und -orientierung des Körpers nach Belieben als direkt bestimmter Parameter variiert werden soll, so ist es ausreichend, wenn ein gewichteter Mittelwert aus der Basisgangart und einigen Standartgangarten, deren ZMP-Parameter verschieden voneinander sind, berechnet wird. Da der Endzustand der Mischgangart nahezu gleich dem gewichteten Mittelwert der Endzustände der zu mischenden Standartgangarten einschließlich der Basisgangart ist, ist es ausreichend, wenn die Wichtungen des gewichteten Mittelwerts so bestimmt werden, dass der Endzustand der Mischgangart (einschließlich der Vor-und-Rück-Position und -geschwindigkeit des Körpers) identisch dem angeforderten Wert ist.

[0150] Wenn die Körperposition aus den tabellierten Zeitreihendaten bestimmt worden ist, so wird die gemischte Gangart den angeforderten Wert bezüglich

der Endzustandsbedingungen vollständig erfüllen. Wird die Körperposition jedoch nacheinander durch dynamische Berechnungen bestimmt, sodass die bestimmte ZMP-Trajektorie erfüllt ist, so weicht sie in geringem Ausmaß ab, wie in der siebten Ausführungsform beschrieben werden wird.

[0151] Beim Bestimmen der Wichtungen sollte jeder der zu mischenden Endzustände der Standartgangarten bekannt sein. Wenn die Endzustände der Standartgangarten als tabellierte Daten vorbereitet und im Speicher gespeichert wurden, so wird es möglich, die Rechenzeit zu reduzieren.

[0152] In der oben erläuterten Weise werden die Mischgangartparameter bestimmt und es werden momentane Werte der angeforderten Gangart zu jeder Zeit erzeugt oder bestimmt, und zwar in der selben Weise, wie der Gangarterzeugungsalgorithmus, der durch einen Offline-Computer vorbereiteten Standartgangart.

[0153] Basierend auf oben Angegebenem wird die Funktionsweise des Systems gemäß der Erfindung unter Bezugnahme auf ein in **Fig. 4** gezeigtes Flussdiagramm erklärt. Das Programm startet bei S10, in welchem die durch einen externen Computer vorbereiteten Standartgangarten in dem ROM **84** geladen oder in diesem gespeichert worden sind. Das Programm schreitet weiter zu S12, in welchem die Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers in jeder Standartgangart berechnet und in dem Speicher gespeichert werden.

[0154] Da die Körperposition wie oben erwähnt als eine Funktion x(k), y(k) vorbereitet worden ist, sollte die Körpergeschwindigkeit aus dem Endwert und dem dem Endwert vorhergehenden Wert in den tabellierten Daten errechnet werden. Genau wird der Endwert der tabellierten Daten sofort als die Position bestimmt und die Differenz zwischen diesem Wert und dem dem Endwert vorhergehenden Wert wird berechnet und wird verwendet, um die Geschwindigkeit zu bestimmen.

[0155] Das Programm schreitet dann zu S14 weiter, in welchem der Zeitgeberwert t auf Null zurückgesetzt wird (mit anderen Worten: der Zeitgeber wird gestartet), dann zu S18 über S16, welchem auf einem Zeitgeberunterbrecher gewartet wird (der Zeitgeber ist verschieden von dem in S14). Die in dem Flussdiagramm von **Fig. 4** gezeigten Prozeduren werden einmal pro vorbestimmte Periode, wie etwa 20 ms, ausgeführt, d. h. der Steuer/Regelzyklus beträgt 20 ms.

[0156] Das Programm schreitet weiter zu S20, in welchem bestimmt wird, ob die Gangart zurzeit gewechselt wird (das Ende eines einzelnen Gehschritts) oder, genauer, ob der Zeitpunkt zum Wechseln des Gehschritts vorliegt. Ist das Ergebnis zustimmend, so schreitet das Programm zu S22 fort, in welchem der Zeitgeber auf Null zurückgesetzt wird, und zu S24, in welchem der angeforderte Wert für die Gangart, genauer der angeforderte Wert der direkt bestimmten Parameter bei der momentanen Gangart

(in die neue Gangart, welche von diesem Zeitpunkt an beginnt), d. h. die vorbenannten a und b, gelesen werden.

[0157] Das Programm schreitet weiter zu S26, in welchem Prozeduren zum Gangartmischen ausgeführt werden.

[0158] **Fig. 14** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine der Gangartmischprozeduren zeigt.

[0159] Das Programm beginnt bei S100, in welchem eine Standartgangart, deren direkt bestimmte Parameter nahe den angeforderten Werten sind, als die Basisgangart ausgewählt wird. Dies wird unter Bezugnahme auf **Fig. 15** erläutert. Da die Standartgangart, deren direkt bestimmte Parameter a, b nahe den angeforderten Werten (dritte Gangarten)  $a_3$ ,  $b_3$  sind, die Standartgangartnummer 0 ist, wird die Standartgangartnummer 0 als die Basisgangart gewählt.

[0160] Das Programm schreitet dann zu S102, in welchem unter Berücksichtigung der oben erwähnten direkt bestimmten Parameter Standartgangarten separat ausgewählt werden, welche sich in einem der direkt bestimmten Parameter von der Basisgangart unterscheiden. Gibt es mehrere Kandidaten, so sollte die Standartgangart gewählt werden, deren Parameter so nahe wie möglich an dem festgestellten Parameter liegt. Es wird bevorzugt, die Standartgangarten mit solchem Parameter auszuwählen, dass der angeforderte Wert zwischen dem Parameter und den Basisgangartparametern liegt. Speziell sollte vorzugsweise dann, wenn die Situation so ist wie in **Fig. 16** gezeigt, die Standartgangart Nr. 1 bezüglich des Parameters a ausgewählt werden.

[0161] Wie in der fünften Ausführungsform erklärt werden wird, so wird sich dann, wenn die Masse des Beingelenks **2** ausreichend kleiner ist als die des Körpers **24**, die durch den Roboter **1** erzeugte Trägheitskraft wenig ändern, wenn sich die Endposition und -orientierung des Fußes des freien Beins in den direkt bestimmten Parametern leicht ändert. Mit anderen Worten würde die Veränderung der Parameter die anderen Parameter hinsichtlich des Erfüllens in der Bedingung des dynamischen Gleichgewichts nicht beeinflussen.

[0162] Unterscheiden sich demnach die Parameter der Endposition und -orientierung des Fußes des freien Beins leicht von denen der Basisgangart, so kann dies leicht gelöst werden, indem der Basisgangartparameter wie angefordert verändert wird. Dadurch wird es unnötig, zu mischende Standartgangarten auszuwählen, deren Parameter für Endposition und -orientierung des Fußes des freien Beins nur von denen der Basisgangart unterschiedlich sind.

[0163] Das Programm schreitet dann weiter zu S104, in welchem die angeforderten Werte für die direkt bestimmten Parameter der gemischten Gangart ersetzt werden, und zu S106, in welchem die abhängigen Parameter der gemischten Gangart unter Verwendung der Gleichungen zur Parameterberechnung (Gleichung 1) berechnet werden.

[0164] Rückkehrend zur Erläuterung von **Fig. 4**

schreitet das Programm dann zu S28 weiter, in welchem die Parameter der gemischten Gangart (tabellierte Werte) für die Sollgangartparameter (tabellierte Werte) ersetzt werden, und zu S30, in welchem die momentanen Werte (d. h. die Werte bei dem momentanen Steuer/Regelzyklus) der Sollgangart berechnet werden.

[0165] **Fig. 17** ist ein Flussdiagramm, welches die Untenoutine der Prozeduren zeigt.

[0166] Um dies zu erläutern, das Programm startet bei S200, in welchem der ZMP zur Zeit  $t$  bestimmt oder auf Grundlage der Mischgangartparameter berechnet wird, und schreitet weiter zu S202, in welchem die Fußposition und -orientierung bestimmt oder auf Grundlage der Mischgangartparameter unter Verwendung der zuvor vorgeschlagenen Technik berechnet werden.

[0167] Das Programm schreitet weiter zu S204, in welchem die Körperhöhe zur Zeit  $t$  aus der Fußposition und -orientierung zur Zeit  $t$  und der horizontalen Körperposition zur Zeit  $t - \Delta t$  bestimmt oder berechnet wird. Da die Details davon in einer anderen Patentanmeldung beschrieben sind, welche wie oben beschrieben zur selben Zeit wie die vorliegende Erfindung eingereicht wurde, und keine direkte Beziehung zum Hauptinhalt der vorliegenden Erfindung haben, wird auf eine Erklärung verzichtet.

[0168] Das Programm schreitet weiter zu S206, in welchem die horizontale Körperposition der Mischgangart zur Zeit  $t$  auf Grundlage der Körperposition zur Zeit  $t$  der ausgewählten Standartgangarten (einschließlich der Basisgangart) gemäß den genannten Gleichungen zum Mischen (Gleichung 1) berechnet wird.

[0169] Es wird zur Erläuterung von **Fig. 4** zurückgekehrt. Das Programm schreitet weiter zu S32, in welchem die Zeit  $t$  mit  $\Delta t$  aktualisiert wird, und kehrt zurück zu S18, um die oben erwähnten Prozeduren zu wiederholen.

[0170] Auf Grundlage der so erzeugten Gangart wird, falls nötig, die Zweibeinausgleichssteuerung/regelung durch den Zweibeinausgleichssteuerer/regler ausgeführt und die Sollgelenkwinkel werden bestimmt. Die Gelenke werden dann so gesteuert/regulated, dass sie den Sollgelenkwinkeln folgen.

[0171] Die Zweibeinausgleichssteuerung/regelung wird kurz unter Bezugnahme auf das Flussdiagramm von **Fig. 18** erklärt. In dem Flussdiagramm startet das Programm bei S300, in welchem eine veränderte Variable der Zweibeinausgleichssteuerung/regelung berechnet wird.

[0172] **Fig. 19** ist ein Flussdiagramm, welches die Unteroutine der Prozeduren zeigt. Das Flussdiagramm wird erläutert. Das Programm beginnt bei S400, in welchem die Ausgabe des Sechs-Achsen-Kraft-Drehmomentsensors **44** gelesen wird, und schreitet weiter zu S402, in welchem die tatsächliche Position des ZMP (dem tatsächlichen Bodenreaktionskraft-Mittelpunkt) bestimmt wird, weiter zu S404, in welchem der bestimmte Wert mit der Soll-ZMP-Po-

sition verglichen wird und der Unterschied zwischen diesen, d. h. die Richtung des Unterschieds und der Betrag des Unterschieds  $X$  bestimmt werden, weiter zu S406, in welchem die veränderte Variable des Fußes gemäß der dort illustrierten Gleichung bestimmt wird, weiter zu S408, in welchem die Fußposition und -Orientierung durch die bestimmte veränderte Variable verändert oder verschoben wird. Die tatsächliche ZMP-Position und der tatsächliche Bodenreaktionskraft-Mittelpunkt sind einander gleich, sie werden daher in dieser Beschreibung als gleich behandelt.

[0173] Es wird zur Erläuterung des Flussdiagramms von Fig. 18 zurückgekehrt. Das Programm schreitet weiter zu S302, in welchem Sollwinkel der zwölf Gelenke durch eine bekannte diverse kinematische Lösung auf Grundlage der Fußpositionen und -orientierungen (korngierte Fußpositionen und -orientierungen, falls im Ausgleichssteuerer/Regler korrigiert) und der Körperposition und -orientierung berechnet werden. Das Programm schreitet weiter zu S304, in welchem die Sollhaltung so korrigiert wird, dass sie den Bodenreaktionskraft-Mittelpunkt absichtlich in Abweichung bringt oder verschiebt, wenn aus der Ausgabe des Neigungssensors **44** bestimmt wird, dass der Roboter **1** instabil ist. Das Programm schreitet weiter zu S306, in welchem alle Gelenke so angesteuert werden, dass sie den Sollgelenkwinkeln folgen. Genauer wird dies durch den zweiten Rechner **82** ausgeführt.

[0174] Durch eine Konfiguration in der beschriebenen Weise kann das System in der ersten Ausführungsform eine Gangart frei und auf Echtzeitbasis erzeugen und kann einen Sollschritt oder eine Drehung in einen Sollwinkel bewirken. Ferner kann das System den auf Beinen beweglichen Roboter dazu bringen, durch Ansteuern der Gelenkwinkel auf Grundlage der auf Echtzeitbasis erzeugten Gangart frei zu gehen.

[0175] Genauer kann das System frei eine angenäherte Gangart auf Echtzeitbasis erzeugen, welche die vorstehend genannten Bedingungen eine Gangart oder der Anforderung einer Gangart erfüllt, und zwar durch geeignetes Auswählen einiger der Gangarten unter den gespeicherten Standartgangarten als die Basisgangart in Antwort auf die Anforderung für den Schritt oder den Drehwinkel sowie durch Mischen (wie Synthetisieren, Modifizieren, etc.), d. h. durch Durchführen einer Näherung.

[0176] Ferner kann das System mit der Anordnung frei eine Gangart mit einem genauen Schritt oder Drehwinkel erzeugen und kann durch Kombinieren und Mischen der Standartgangarten nach Ermessen eine dazwischen liegende mittlere Gangart erzeugen.

[0177] Das System kann ferner die Menge oder den Umfang der Berechnung reduzieren. Genauer gesagt wird der Rechenumfang im ersten Rechner **80** um 90% reduziert, verglichen mit einem Fall, in welchem das Roboterdynamikproblem auf Echtzeitbasis gelöst wird. Da ferner die geeigneten Standartgangarten im Voraus gespeichert sind und eine Gangart

durch miteinander Mischen der Standartgangarten neu erzeugt wird, wird es möglich, die Größe oder Kapazität an Speicher (der ROM **84**) zu reduzieren. Da ferner die Standartgangarten optimal vorbereitet werden können, wird es möglich, einfach und ohne Versuch-und-Fehler eine neue Gangart zu erzeugen, welche die oben erwähnten Bedingungen 1) bis 5) erfüllt.

[0178] Fig. 20 ist ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0179] In der zweiten Ausführungsform wird zusätzlich zu den Standartgangarten eine Empfindlichkeit eines Gangartparameters verwendet. Die „Empfindlichkeit“ bedeutet allgemein das Verhältnis der Antwort oder Änderung, die in der Ausgabe hervorgerufen wird, zu einem Impuls oder einer Veränderung in der Eingabe. In der zweiten Ausführungsform wird ein Änderungsbetrag eines Gangartparameters pro Einheit eines Änderungsbetrags des anderen Gangartparameters bestimmt oder berechnet. Der Änderungsbetrag eines Gangartparameters wird als „Gangartparameterempfindlichkeit“ bezeichnet und wird dazu verwendet, den Änderungsbetrag (oder Veränderung) eines Parameters zu bestimmen.

[0180] Einfacher ausgedrückt, bezieht sich die Gangartparameterempfindlichkeit darauf, wie stark die abhängigen Parameter geändert oder variiert werden sollten, damit die geänderte Gangart wünschenswerte Bedingungen aufrecht erhält, ob und wann die direkt bestimmten Parameter (wie die Anfangsorientierung  $a$  des Fußes des freien Beins, die Anfangs-Vor-und-Rück-Position  $b$  des Fußes des freien Beins der ersten Ausführungsform) um einen geringen Betrag verändert werden. Die Gangartparameterempfindlichkeit ist daher definiert als der Betrag der Änderung der abhängigen Parameter pro Einheitsbetrag der direkt bestimmten Parameter.

[0181] In der zweiten Ausführungsform wird als Ergebnis die Anzahl an Standartgangarten reduziert und es werden nur die verwendet, die für die Basisgangart geeignet sind. Genauer werden die Standartgangarten, welche eine Reihe von kontinuierlichen Gangarten umfassen, mit einer Gangart zum Beginnen des Gehens aus der Standposition, einer Gangart zum Beschleunigen der Gehgeschwindigkeit, einer Gangart für Gehen mit konstanter Geschwindigkeit, einer Gangart zum Verlangsamen der Gehgeschwindigkeit sowie einer Gangart zum Anhalten des Gehens, ähnlich verwendet. Es werden jedoch keine anderen Standartgangarten, deren Parameter von denen der Reihe nacheinander folgender Gangarten leicht verschieden sind, vorbereitet.

[0182] Genauer wird die Empfindlichkeit eines Parameters  $q$  relativ zu einem Parameter  $p$  in einer Standartgangart  $i$  als  $D_i(q, p)$  beschreiben. In den tabellierten Daten wird die Empfindlichkeit eines  $k$ -ten Datums  $x(k)$  relativ zum Parameter  $p$  in ähnlicher Weise als  $D_i(x(k), p)$  beschrieben.

[0183] Es wird die Erzeugung der angeforderten

Gangart in der zweiten Ausführungsform beschreiben.

[0184] Die Beziehungen zwischen der Empfindlichkeit des Parameters  $c$  relativ zum Parameter  $a$  in der Standardgangart Nr. 0 (bezeichnet als  $D0(c, a)$ ) und die in der Standardgangart Nr. 1 werden im Folgenden gemäß den Definitionen gezeigt, wenn  $(a1 - a0)$  ausreichend klein ist.

$$D0(c, a) = (c1 - c0)/(a1 - a0)$$

$$D0(d, a) = (d1 - d0)/(a1 - a0)$$

$$D0(x(k), a) = (x1(k) - x0(k))/(a1 - a0)$$

$$D0(y(k), a) = (y1(k) - y0(k))/(a1 - a0)$$

[0185] Ähnlich werden die Beziehungen zwischen der Empfindlichkeit des Parameters  $c$  relativ zum Parameter  $b$  in der Standardgangart Nr. 0 (bezeichnet als  $D0(c, b)$ ) und die in der Standardgangart Nr. 2 wie folgt gemäß den Definitionen gezeigt, wenn  $(b2 - b0)$  ausreichend klein ist.

$$D0(c, b) = (c2 - c0)/(b2 - b0)$$

$$D0(d, b) = (d2 - d0)/(b2 - b0)$$

$$D0(x(k), b) = (x2(k) - x0(k))/(b2 - b0)$$

$$D0(y(k), b) = (y2(k) - y0(k))/(b2 - b0)$$

[0186] Man erhält das Folgende als Gleichungen zur Parameterbestimmung (hier im Folgenden als „Gleichung 2“ bezeichnet), indem man diese in die Gleichungen zum Mischen der Parameter und tabellierten Daten in der erste Ausführungsform einsetzt.

$$c3 = c0 + D0(c, a)*(a3 - a0) + D0(c, b)*(b3 - b0)$$

$$d3 = d0 + D0(d, a)*(a3 - a0) + D0(d, b)*(b3 - b0)$$

$$x3(k) = x0(k) + D0(x(k), a)*(a3 - a0) + D0(x(k), b)*(b3 - b0)$$

$$y3(k) = y0(k) + D0(y(k), a)*(a3 - a0) + D0(y(k), b)*(b3 - b0)$$

[0187] Auf Grundlage des oben Genannten wird erst die Funktionsweise der zweiten Ausführungsform unter Bezugnahme auf **Fig. 20** erläutert. Das Programm beginnt bei S500, in welchem die Basisgangarten und Gangartparameterempfindlichkeiten, welche durch einen Offline-Computer vorbereitet worden sind, in einem Speicher gespeichert werden, und führt dann weiter zu S502 und zu S514, um die gleichen Prozeduren auszuführen wie die der ersten Ausführungsform, und dann zu S516, in welchem die Prozeduren zum Gangartmischen ausgeführt werden.

[0188] **Fig. 21** ist ein Flussdiagramm zum Darstellen der Unterroutine der Prozeduren. Das Programm beginnt bei S600, in welchem die Basisgangart ausgewählt wird, deren direkt bestimmte Parameter nahe bei den angeforderten Werten liegen, und schreitet weiter zu S602, in welchem die angeforderten Werte für die direkt bestimmten Parameter der Mischgangart eingesetzt werden, dann zu S604, in welchem die abhängigen Parameter gemäß Gleichung 2 berechnet werden. Die tabellierten Daten der horizontalen Körperposition können zu einer Zeit berechnet werden. Da jedoch der Umfang der Berechnung dieser groß ist, kann es sein, dass jeder Wert, der für den momentanen Steuer/Regelzyklus notwendig ist, in der Unterroutine der später erklärten Momentanwertberechnung berechnet wird.

[0189] Es wird zur Erläuterung von **Fig. 20** zurückgekehrt. Das Programm schreitet weiter zu S520, über S518, in welchem die momentanen Werte der Sollgangart berechnet werden.

[0190] **Fig. 22** ist ein Flussdiagramm, welches die Unterroutine der Prozeduren zeigt. Das Programm beginnt bei S700 und schreitet dann zu S702 und zu S706 fort, in welchen die Positionen und Orientierungen der Füße und des Körpers berechnet werden. In S706 wird die horizontale Körperposition gemäß den sich auf  $x, y$  beziehenden Gleichungen in Gleichung 2 berechnet. Es wird zur Erläuterung von **Fig. 20** zurückgekehrt. Das Programm kehrt über S522 nach S508 zurück, um die Prozeduren zu wiederholen.

[0191] Bei einer Konfiguration in der vorstehenden Art und Weise weist das System in der zweiten Ausführungsform dieselben Vorteile auf wie die der ersten Ausführungsform.

[0192] Die Überlegenheit der zweiten Ausführungsform gegenüber der ersten Ausführungsform hängt jedoch von der Kombination der Standardgangarten oder der Natur oder dem Charakter der in dem Speicher gespeicherten Standardgangarten ab. Wird beispielsweise der gesamte Raum, welcher durch die Kombinationen von direkt bestimmten Parametern erzeugt wird, als ein Parameterraum benannt, so kann die erste Ausführungsform derart ausgebildet werden, dass die direkt bestimmten Parameter für ein bestimmtes Intervall in einer solchen Weise diskretisiert werden, dass in dem Parameterraum gitterartige diskrete Räume vorgesehen sind und Sollstandardgangarten werden für alle Kombinationen der direkt bestimmten Parameter in den diskreten Räumen vorbereitet. Genauer gesagt kann die erste Ausführungsform so konfiguriert werden, dass die Parameter, welche nicht die direkt bestimmten Parameter sind, d. h. die abhängigen Parameter, so eingestellt werden, dass die Gangarten wünschenswerte Gangarten werden.

[0193] Wird die erste Ausführungsform mit Standardgangarten ausgestattet, welche in der oben erwähnten Weise vorbereitet worden sind, so können die meisten der Standardgangarten die Bedingung erfüllen, die Basisgangart zu sein. (Die Standardgang-

art, deren direkt bestimmte Parameter bis auf einen Parameter vollständig gleich sind mit denen der anderen existierenden Standartgangart, kann die Bedingungen als Basisgangart erfüllen.) Wenn die erste Ausführungsform wie oben modifiziert ist, so wird keine Parameterempfindlichkeit zum freien Erzeugen von Gangarten benötigt.

[0194] Es sollte in der zweiten Ausführungsform bemerkt werden, dass dann, wenn die Parameterempfindlichkeiten für verschiedene Gangarten nahezu gleich sind, die Parameterempfindlichkeiten nicht für jede Gangart vorbereitet werden müssen, sondern es kann eine vorbereitet werden, die allgemein gültig für alle Gangarten ist. Mit der Anordnung kann die Kapazität des Speichers (des ROMs **84**) verglichen mit der ersten Ausführungsform im großen Ausmaß reduziert werden.

[0195] Sind z. B.  $D_0(c, a)$ ,  $D_1(c, a)$ ,  $D_2(c, a)$  ...  $D_n(c, a)$  annähernd gleich, so kann stattdessen in allen Gleichungen zur Parameterbestimmung der Mittelwert  $D(c, a)$  davon verwendet werden.

[0196] **Fig. 23** ist ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der dritten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0197] In der dritten Ausführungsform werden sowohl die in der ersten Ausführungsform verwendeten Standartgangarten als auch die Parameterempfindlichkeiten der zweiten Ausführungsform verwendet.

[0198] Die Erzeugung einer angeforderten Gangart in der dritten Ausführungsform wird nun erläutert.

[0199] Beim Berechnen der abhängigen Parameterwerte wird in der dritten Ausführungsform der Einfluss der direkt bestimmten Parameter teilweise unter Verwendung der Methode der ersten Ausführungsform bestimmt, während der Rest des Einflusses unter Verwendung der zweiten Ausführungsform bestimmt wird. Genauer werden sowohl ein Gangartmischen als auch ein Zusatz an Störung aufgrund der Gangartparameterempfindlichkeit verwendet.

[0200] Werden genauer gesagt die erste Ausführungsform für den Einfluss des direkt bestimmten Parameters  $\underline{a}$  und die zweite Ausführungsform für den des Parameters  $\underline{b}$  verwendet, so werden die Gleichungen für eine Parameterbestimmung wie folgt neu geschrieben.

$$c_3 = c_0 + (c_1 - c_0) \cdot (a_3 - a_0) / (a_1 - a_0) + D_0(c, b) \cdot (b_3 - b_0)$$

$$d_3 = d_0 + (d_1 - d_0) \cdot (a_3 - a_0) / (a_3 - a) + D_0(d, b) \cdot (b_3 - b_0)$$

$$x_3(k) = x_0(k) + (x_1(k) - x_0(k)) \cdot (a_3 - a_0) / (a_1 - a_0) + D_0(x(k), b) \cdot (b_3 - b_0)$$

$$y_3(k) = y_0(k) + (y_1(k) - y_0(k)) \cdot (a_3 - a_0) / (a_1 - a_0) + D_0(y(k), b) \cdot (b_3 - b_0)$$

[0201] Es wird die Funktionsweise unter Bezugnahme auf **Fig. 23** erläutert. Das Programm beginnt bei

S800, in welchem die Standartgangarten und Gangartparameterempfindlichkeiten, welche durch einen Offline-Computer vorbereitet und in einem Speicher gespeichert worden sind, gelesen werden, und schreitet weiter zu S802 und weiter, in welchen dieselben Prozeduren wie bei der ersten Ausführungsform durchlaufen werden, dann zu S900 und weiter, über S816, wie in einem Flussdiagramm von **Fig. 24** beschrieben ist, in welchem das Gangartmischen ausgeführt wird. Das Programm schreitet dann von S820 im Flussdiagramm von **Fig. 23** nach S1000 und weiter in einem Flussdiagramm von **Fig. 25**, in welchem die Momentanwerte berechnet werden.

[0202] Mit einer Konfiguration in der vorstehenden Art und Weise weist das System in der dritten Ausführungsform dieselben Vorteile der vorhergehenden Ausführungsformen auf.

[0203] **Fig. 26** ist ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der vierten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0204] Wie in **Fig. 27** illustriert ist, tendieren die Körperpositionen und -orientierungen in den aus den Standartgangarten erhaltenen gemischten Gangarten (angeforderte Gangart) dazu, an der Gangartgrenze zueinander leicht unkontinuierlich zu sein. Die Endposition und -geschwindigkeit des Körpers einer gemischten Gangart sollte deshalb in Einklang gebracht werden mit der Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers der nächsten gemischten Gangart. Im Hinblick darauf ist die vierte Ausführungsform so ausgebildet, dass die Randbedingungen der Körperposition und -orientierung frei bestimmt werden kann. Mit anderen Worten werden die Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers als die direkt bestimmten Parameter angesehen, was es der Körperposition und -geschwindigkeit ermöglicht, an der Gangartgrenze kontinuierlich zu sein.

[0205] In Zusammenfassung dieser Methode wird zunächst die gemischte Gangart erzeugt, in welcher alle direkt bestimmten Parameter (bis auf die der Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers) so sind wie gewünscht, wobei irgendeine Methode aus der ersten bis dritten Ausführungsform verwendet wird. Dann werden die ZMP-Parameter korrigiert, damit die Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers so sind wie gewünscht.

[0206] Da die früheren dieser Prozeduren dieselben sind wie die vorherigen Ausführungsformen, wird auf eine Erläuterung verzichtet. Eine Erläuterung wird nur gegeben für die letztere dieser Prozeduren zum Konigieren der ZMP-Parameter derart, dass die Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers so werden wie gewünscht.

[0207] In der in den vorhergehenden Ausführungsformen beschriebenen Gangarterzeugung nehme man an, dass die Gangartparameter (bis auf die Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers, die Endposition und -geschwindigkeit des Körpers sowie

die ZMP-Parameter) fest sind.

[0208] Unter der Annahme wird dann, wenn die Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers und die ZMP-Parameter bestimmt worden sind, eine Gangart, die die dynamische Gleichgewichtsbedingung erfüllt, deterministisch bestimmt. Als Ergebnis werden die Endposition und -geschwindigkeit des Körpers deterministisch bestimmt. Andererseits wird ein Vorgeben der Endposition und -geschwindigkeit des Körpers und des ZMP-Musters deterministisch die Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers ergeben. Das bedeutet, dass um die Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers und die Endposition und -geschwindigkeit des Körpers frei zu bestimmen, das ZMP-Muster in Antwort darauf eingestellt werden sollte. Umgekehrt gesagt, wenn das ZMP-Muster einmal bestimmt worden ist, so ist die Beziehung zwischen der Kombination der Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers und der Kombination der Endposition und -geschwindigkeit des Körpers ein eindeutige Abbildung.

[0209] Um die Erklärung zu vereinfachen, wird nur das Verhalten der Vor-und-Rück-Richtung des Körpers (d. h. die X-Richtung) diskutiert. Da die Zustandsgrößen zwei Parameter sind, d. h. die Position und die Geschwindigkeit, sollte das ZMP-Muster zwei oder mehr Parameter besitzen, damit deren Gangartbedingungen frei bestimmt werden können.

[0210] Die ZMP-Muster und deren Parameter sind so definiert, wie in **Fig. 28** gezeigt, so dass die Grenzposition und -geschwindigkeit des Körpers stark verändert werden kann, wenn die ZMP-Parameter um einen geringen Betrag verändert werden.

[0211] Das in der Figur illustrierte ZMP-Muster ist komplizierter als das in den vorhergehenden Ausführungsformen. Der Grund ist, dass, wenn ein ZMP-Muster verwendet wird, welches irgendeinem in den vorhergehenden Ausführungsformen ähnelt, so muss zusätzlich zum Parameter  $c$  ein weiterer Parameter in der Zeit  $t_2$  (welcher die Fußtrajektone nicht beeinflusst) ebenfalls variiert werden. Jedoch wird selbst dann, wenn der Parameter in der Zeit  $t_2$  stark variiert wird, die Grenzposition und -geschwindigkeit des Körpers nur um einen geringen Betrag konigiert werden.

[0212] In der vierten Ausführungsform kann der ZMP-Parameter unter Verwendung irgendeiner Methode der ersten oder zweiten Ausführungsform bestimmt werden. Demnach werden in der vierten Ausführungsform unter Verwendung der Methode der dritten Ausführungsform ein Korrekturbetrag für die ZMP-Parameter und korrigierte Körpertrajektorien in einer weiter unten erläuterten Art und Weise bestimmt. Der Korrekturbetrag für die ZMP-Parameter ist ein Korrekturbetrag, welcher zu den ZMP-Parameter der Mischgangart zu addieren ist, damit die Randbedingungen des Körpers für die Mischgangart gewünschte Werte annehmen.

[0213] Es wird die Funktionsweise des Systems gemäß der vierten Ausführungsform unter Bezugnah-

me auf **Fig. 26** erläutert. Das Programm beginnt bei S1100, in welchem die auf einem Offline-Computer vorbereiteten Standardgangarten ähnlich der vorhergehenden Ausführungsformen in einem Speicher gespeichert worden sind, und schreitet fort zu S1102, in welchem die Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers der verschiedenen Standardgangarten bestimmt und im Speicher gespeichert werden, sowie zu S1104, in welchem die folgenden Prozeduren durchlaufen werden.

[0214] Speziell wird, wie in **Fig. 29** illustriert, der ZMP-Parameter  $c$  in der Mischgangart um einen Betrag  $\Delta c$  leicht gestört und in Antwort darauf wird ein Störbetrag  $\Delta x(k)$  der zu störenden tabellierten Zeitreihendaten der Körperposition berechnet, derart, dass die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts erfüllt ist. Die Beziehung zwischen diesen Größen ist wie folgt definiert.

$$R_{\text{mix}}(x(k), c) = \Delta x(k)/\Delta c$$

[0215] Dabei wird  $R_{\text{mix}}(x(k), c)$  (was der vorbenannten Gangartparameterempfindlichkeit entspricht) eine partielle Differentialempfindlichkeit von  $x(k)$  relativ zu  $c$  genannt. Wie in **Fig. 30** illustriert, wird auf ähnliche Weise  $R_{\text{mix}}(x(k), e)$  relativ zum ZMP-Parameter  $e$  bestimmt.

[0216] Wenn in der zweiten Ausführungsform die Empfindlichkeit von  $x(k)$  relativ zu einem bestimmten angegebenen Parameter bestimmt wird, so werden abhängige Parameter verschieden von  $x(k)$  oder dem angegebenen Parameter eingestellt, während das Optimum der Gangart als Zwangsbedingungen beibehalten werden. Im Gegensatz dazu sind in der vierten Ausführungsform alle Parameter (andere als der angegebene Parameter und  $x(k)$ ) festgesetzt und die Empfindlichkeiten werden bestimmt, wobei das Optimum der Gangart ignonert wird. Symbolisch gesprochen bestimmt die zweite Ausführungsform Werte eines totalen Differentials, wobei das Gangartoptimum als Zwangsbedingungen behandelt werden, während die vierte Ausführungsform Werte des partiellen Differentials bestimmt, ohne das Gangartoptimum zu beachten.

[0217] Es wird zurückgekehrt zur Erläuterung von **Fig. 26**. Das Programm schreitet weiter zu S1106, in welchem auf Grundlage der Endwerte und der diesen unmittelbar vorangehenden Werte von  $R_{\text{mix}}(x(k), c)$  und  $R_{\text{mix}}(x(k), e)$  eine partielle Differentialempfindlichkeit  $R_{\text{mix}}(X_e, c)$  in der Körperendposition und eine partielle Differentialempfindlichkeit  $R_{\text{mix}}(V_e, c)$  relativ zum ZMP-Parameter  $c$  der Mischgangart, eine partielle Differentialempfindlichkeit  $R_{\text{mix}}(X_e, e)$  der Körperendposition und eine partielle Differentialempfindlichkeit  $R_{\text{mix}}(V_e, e)$  relativ zum ZMP-Parameter  $e$  der gemischten Gangart wie folgt berechnet werden.

$$R_{\text{mix}}(X_e, c) = R_{\text{mix}}(x(k_e), c)$$

$$R_{\text{mix}}(V_e, c) = \{R_{\text{mix}}(x(k_e), c) - R_{\text{mix}}(x(k_e - 1), c)\}/\Delta t$$

$$R_{mix}(X_e, e) = R_{mix}(x(k_e), e)$$

$$R_{mix}(V_e, e) = \{R_{mix}(x(k_e), e) - R_{mix}(x(k_e - 1), e)\} / \Delta t$$

[0218] Dabei sind:  $k_e$ : endgültige Anzahl von tabellierten Daten,  $\Delta t$ : Abtastzeit, genauer, Abtastintervall in den tabellierten diskreten zeitfreien Daten.

[0219] Das Programm schreitet weiter zu S1108, in welchem eine Matrix der Dimension  $2 \times 2$  erzeugt wird, mit  $R_{mix}(X_e, c)$  als das Element der ersten Reihe, ersten Spalte,  $R_{mix}(X_e, e)$  als das Element der ersten Reihe, zweiten Spalte,  $R_{mix}(V_e, c)$  als das Element der zweiten Reihe, ersten Spalte,  $R_{mix}(V_e, e)$  als das Element der zweiten Reihe, zweiten Spalte.

[0220] Das Programm schreitet weiter zu S1110, in welchem die inverse Matrix der soeben erzeugten Matrix berechnet wird. In der inversen Matrix ist das Element der ersten Reihe, ersten Spalte eine partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $c$  relativ zur Endposition  $X_e$  des Körpers (bezeichnet als  $R_{mix}(c, X_e)$ ), das Element der zweiten Reihe, erste Spalte ist eine partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $e$  relativ zur Endposition  $X_e$  des Körpers (bezeichnet als  $R_{mix}(e, X_e)$ ), das Element der ersten Reihe, zweiten Spalte ist eine partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $c$  relativ zur Endgeschwindigkeit  $V_e$  des Körpers (bezeichnet als  $R_{mix}(c, V_e)$ ) und das Element der zweiten Reihe, zweiten Spalte ist eine partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $e$  relativ zur Endgeschwindigkeit  $V_e$  des Körpers (bezeichnet als  $R_{mix}(e, V_e)$ ).

[0221] Ändern sich diese Empfindlichkeiten bei allen der gemischten Gangarten genügend, so können deren Mittelwerte  $R(c, X_e)$ ,  $R(e, X_e)$ ,  $R(c, V_e)$ ,  $R(e, V_e)$  stattdessen für alle Gangarten verwendet werden.

[0222] Das Programm schreitet weiter zu S1112, in welchem die Anfangsposition des Körpers in der gemischten Gangart um einen geringen Betrag  $\Delta x_0$  verschoben oder gestört wird, wie in **Fig. 31** illustriert ist, und ein Störbetrag  $\Delta x(k)$  für die tabellierten Zeitreihendaten der Körperposition wird in Antwort darauf bestimmt, so dass die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts erfüllt ist. Der Wert ist offensichtlich wie folgt.

$$\Delta x(0) = \Delta x_0$$

[0223]  $R_{mix}(x(k), x_0)$  wird wie folgt bestimmt.

$$R_{mix}(x(k), x_0) = \Delta x(k) / \Delta x_0$$

[0224] Ähnlich wird die Anfangsgeschwindigkeit des Körpers um einen kleinen Betrag  $\Delta v_0$  verschoben oder gestört, wie in **Fig. 32** illustriert ist, und  $R_{mix}(x(k), v_0)$  wird in einer ähnlichen Weise bestimmt.

[0225] Das Programm schreitet weiter zu S1114, in welcher auf Grundlage der Endwerte und der diesen unmittelbar vorangehenden Werte der bestimmten Empfindlichkeiten  $R_{mix}(x(k), x_0)$  und  $R_{mix}(x(k), v_0)$

eine partielle Differentialempfindlichkeit der Körperendposition und eine partielle Differentialempfindlichkeit relativ zur Körperanfangsposition in der Mischgangart (bezeichnet als  $R_{mix}(X_e, x_0)$  und  $R_{mix}(V_e, x_0)$ ), partielle Differentialempfindlichkeit der Körperendposition und eine partielle Differentialempfindlichkeit relativ zur Körperanfangsgeschwindigkeit in der Mischgangart (bezeichnet als  $R_{mix}(X_e, v_0)$  und  $R_{mix}(V_e, v_0)$ ) wie folgt berechnet werden.

$$R_{mix}(X_e, x_0) = R_{mix}(x(k_e), x_0)$$

$$R_{mix}(V_e, x_0) = \{R_{mix}(x(k_e), x_0) - R_{mix}(x(k_e - 1), x_0)\} / \Delta t$$

$$R_{mix}(X_e, v_0) = R_{mix}(x(k_e), v_0)$$

$$R_{mix}(V_e, v_0) = \{R_{mix}(x(k_e), v_0) - R_{mix}(x(k_e - 1), v_0)\} / \Delta t$$

[0226] Dabei sind:  $k_e$ : endgültige Anzahl an tabellierten Daten,  $\Delta t$ : Abtastzeit der tabellierten Daten.

[0227] Das Programm schreitet dann weiter zu S1116, in welchem der Zeitgeber auf Null zurückgesetzt und gestartet wird, weiter zu S1120, über S1118, in welchem auf einen Zeitgeberunterbrecher gewartet wird, weiter zu S1122, in welchem bestimmt wird, ob die Gangart zu wechseln ist. Ist das Ergebnis zustimmend, so schreitet das Programm weiter zu S1124, in welchem der Zeitgeber auf Null zurückgesetzt wird, dann zu S1126, in welchem die geforderten Werte der direkt bestimmten Parameter gelesen werden, dann zu S1128, in welchem das Gangartmischen durchgeführt wird.

[0228] Genauer schreitet das Programm zu S1200 des Untenoutinen-Flussdiagramms von **Fig. 33**, in welchem die Mischgangartparameter unter Verwendung irgendeiner Methode der ersten bis dritten Ausführungsform erzeugt werden. Bei dieser Erzeugung der Mischgangartparameter wird von Gangarten eine Gangart, deren Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers nahe bei den geforderten Werten liegen, als die Basisgangart ausgewählt.

[0229] Einmal als die Basisgangart ausgewählt werden jedoch die Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers von den direkt bestimmten Parametern ausgeschlossen und die Mischgangart wird in derselben Weise wie bei den vorhergehenden Ausführungsformen erzeugt.

[0230] Das Programm schreitet dann zu S1202, in welchem die Differenzen zwischen der geforderten Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers und der Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers für die Mischgangart berechnet werden. Die Differenzen werden mit  $\Delta x_0$ ,  $\Delta v_0$  benannt. Ähnlich werden die Differenzen zwischen der geforderten Endposition und -geschwindigkeit des Körpers und der Endposition und -geschwindigkeit des Körpers für die Mischgangart berechnet und mit  $\Delta X_e$ ,  $\Delta V_e$  benannt.

[0231] Das Programm schreitet weiter zu S1204, in welchem nur die Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers in der gemischten Gangart mit der geforderten Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers ersetzt werden. Es werden dann die Störbeträge der Endposition und -geschwindigkeit des Körpers für die Gangart durch die folgenden Gleichungen berechnet, wenn die tabellierten Zeitreihendaten der Körperposition in Antwort darauf derart gestört werden, dass die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts erfüllt ist (bezeichnet als  $\Delta X_{se}$ ,  $\Delta V_{se}$ ).

$$\Delta X_{se} = R_{mix}(X_e, x_0) \cdot \Delta x_0 + R_{mix}(X_e, v_0) \cdot \Delta v_0$$

$$\Delta V_{se} = R_{mix}(V_e, x_0) \cdot \Delta x_0 + R_{mix}(V_e, v_0) \cdot \Delta v_0$$

[0232] In der in S1204 erhaltenen Gangart stimmen die Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers mit den angeforderten Werten überein. Die Endposition und -geschwindigkeit des Körpers sind jedoch nicht gleich der geforderten Endposition und -geschwindigkeit des Körpers und weichen um  $\Delta X_e + \Delta X_{se}$  und  $\Delta V_e + \Delta V_{se}$  ab. Das Programm schreitet daher zu S1206, in welchem ZMP-Parameter-Korrekturbeträge  $\Delta c$  und  $\Delta e$  zum Reduzieren der Differenzen auf Null durch die folgenden Gleichungen berechnet werden.

$$\Delta c = R_{mix}(c, X_e) \cdot (\Delta X_e + \Delta X_{se}) + R_{mix}(c, V_e) \cdot (\Delta V_e + \Delta V_{se})$$

$$\Delta e = R_{mix}(e, X_e) \cdot (\Delta X_e + \Delta X_{se}) + R_{mix}(e, V_e) \cdot (\Delta V_e + \Delta V_{se})$$

[0233] Das Programm schreitet weiter zu S1208, in welchem die ZMP-Parameter  $c$ ,  $e$  unter Verwendung der folgenden Gleichungen berechnet werden.

$$c = c_{mix} + \Delta c$$

$$e = e_{mix} + \Delta e$$

[0234] Hierbei sind  $c_{mix}$ : Wert des Mischgangartparameters  $\underline{c}$ ;  $e_{mix}$ : Wert des Mischgangartparameters  $\underline{e}$ .

[0235] Es wird zur Erläuterung des Flussdiagramms von Fig. 26 zurückgekehrt. Das Programm schreitet dann weiter zu S1130, in welchem die Mischgangartparameter für Sollgangartparameter ersetzt werden. Es werden hier die in S1208 erhaltenen Werte für die Parameter  $\underline{c}$ ,  $\underline{e}$  ersetzt. Das Programm schreitet dann weiter zu S1132, über S1122, in welchem die momentanen Werte der Sollgangart berechnet werden.

[0236] Genauer schreitet das Programm in einem Flussdiagramm von Fig. 34 weiter zu S1300, in welchem der ZMP zur Zeit  $t$  unter Verwendung irgendeiner Methode der vorhergehenden Ausführungsfor-

men bestimmt wird, weiter zu S1302, in welchem die Fußposition und -orientierung zur Zeit  $t$  unter Verwendung irgendeiner Methode der vorhergehenden Ausführungsformen bestimmt werden, weiter zu S1304, in welchem die Körperposition der Sollgangart unter Verwendung der folgenden Gleichung bestimmt wird.

$$x(k) = x_{mix}(k) + R_{mix}(x(k), c) \cdot \Delta c + R_{mix}(x(k), e) \cdot \Delta e + R_{mix}(x(k), x_0) \cdot \Delta x_0 + R_{mix}(x(k), v_0) \cdot \Delta v_0$$

[0237] Hierbei ist  $x_{mix}(k)$ :  $k$ -tes Datum in den tabellierten Zeitreihendaten der Körpertrajektorie für die Mischgangart. Obwohl eine Erläuterung hier nicht gegeben wird, wird die Körperposition in der Y-Richtung ähnlich berechnet. Die Körperposition in der Z-Richtung kann in derselben Weise berechnet werden wie die X-, Y-Richtungswerte oder kann unter Verwendung der Technik berechnet werden, welche in der zum selben Datum wie die vorliegende Erfindung eingereichten Anmeldung beschrieben ist.

[0238] In der oben beschriebenen Weise kann genauer durch Überlagerung von in Fig. 27, 29 bis 32 gezeigten Wellenformen die Sollgangart mit den wie gewünscht gestalteten Randbedingungen, wie in Fig. 35 illustriert, erzeugt werden. In Fig. 35 sind die Situationen wie folgt eingerichtet.

$$c < 0, c + \Delta c < 0, e < 0, e + \Delta e > 0$$

[0239] Durch eine Konfiguration in der vorstehenden Weise kann das System in der vierten Ausführungsform Gangarten frei und auf Echtzeitbasis erzeugen und kann Verlagerungen und Geschwindigkeiten von Roboterabschnitten an den Grenzen der Gangarten kontinuierlich vorsehen.

[0240] Fig. 36 ist ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der fünften Ausführungsform der Erfindung zeigt.

[0241] In der oben erwähnten vierten Ausführungsform werden die partielle Differentialempfindlichkeit der Körperpositionszeitreihen relativ zu dem ZMP-Parameter  $\underline{c}$  der Mischgangart ( $R_{mix}(x(k), c)$ ), die partielle Differentialempfindlichkeit der Körperpositionszeitreihen relativ zum ZMP-Parameter  $\underline{e}$  der Mischgangart ( $R_{mix}(x(k), e)$ ), die partielle Differentialempfindlichkeit der Körperpositionszeitreihen relativ zur Anfangsposition des Körpers ( $R_{mix}(x(k), x_0)$ ) sowie die partielle Differentialempfindlichkeit der Körperpositionszeitreihen relativ zur Anfangsgeschwindigkeit des Körpers ( $R_{mix}(x(k), v_0)$ ) verwendet. Die vierte Ausführungsform weist sozusagen ein Modell der Störung der Körpertrajektorie in tabellierten Zeitreihendaten relativ zur ZMP-Störung auf.

[0242] Die fünfte Ausführungsform nutzt stattdessen ein lineares dynamisches Störungsmodell (ein lineares Modell, welches die Beziehung von Störungen der Körperposition und -geschwindigkeit relativ zu einer Störung des ZMP ausdrückt), welches durch die folgenden Ausdrücke beschrieben wird, so dass es die Randbedingungen der Körperposition und -ge-

schwindigkeit mit den geforderten Werten in Einklang bringt.

[0243] Das Grundprinzip dieser Methode wird zunächst erklärt. Obwohl das Körperverhalten und die ZMP-Trajektorie nur in der Vor-und-Rück-Richtung (X-Richtung) diskutiert werden, gilt dasselbe auch für die Links-und-Rechts-Richtung (Y-Richtung).

[0244] Es sei angenommen, dass die Masse des Körpers **24** des Roboters **1** ausreichend größer ist als die der anderen Teile und dass die vertikale Körperbeschleunigung während des Gehens relativ gering ist. Wenn diese spezielle Bedingung erfüllt ist, so kann die Beziehung der Störung der Körperposition und -geschwindigkeit relativ zur ZMP-Störung, d. h. das dynamische Störungsmodell, durch die folgende Gleichung, d. h. durch ein in **Fig. 37** illustriertes, lineares umgekehrtes Pendelmodell, angenähert werden. Wie in der Figur illustriert ist, weist das Modell einen Unterstützungspunkt **22a** auf, welcher beweglich ist.

$$dx_{mdl}/dt = v$$

$$dv_{mdl}/dt = \omega_0^{2*}(x_{mdl} - ZMP_{mdl})$$

[0245] Hierbei sind  $x_{mdl}$ : Die Position des Massenmittelpunkts des linearen umgekehrten Pendels,  $v_{mdl}$ : die Geschwindigkeit des Massenmittelpunkts des linearen umgekehrten Pendels.  $\omega_0$  ist eine positive Konstante, welche durch die Beziehung zwischen der Höhe des Schwerpunkts des Körpers  $h$  und der Gravitationskonstante  $g$  wie folgt angenähert wird.

$$\omega_0 = \sqrt{g/h}$$

[0246] Wenn die spezielle Bedingung erfüllt ist, so kann das lineare umgekehrte Pendelmodell anstatt des Störungsmodells (welches allgemeiner ist als das oben erwähnte Modell), welches durch  $R_{mix}(x(k), c)$ ,  $R_{mix}(x(k), e)$ ,  $R_{mix}(x(k), x_0)$ ,  $R_{mix}(x(k), v_0)$  ausgedrückt und in der vierten Ausführungsform verwendet wurde, verwendet werden. Wenn in der folgenden Erläuterung die Zustände des Modells vorzugsweise mit der Zeit beschnitten werden sollten, so werden diese als  $x_{mdl}(t)$ ,  $v_{mdl}(t)$  usw. beschrieben.

[0247] Auf Grundlage des oben Dargelegten wird die Funktionsweise unter Bezugnahme auf **Fig. 36** erläutert. Die Konfiguration des ZMP-Musters ist die gleiche, wie die in der vierten Ausführungsform.

[0248] Das Programm startet bei S1400, in welchem die Standardgangarten in einem Speicher gespeichert worden sind und schreitet weiter zu S1402, in welchem die Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers in jedem der Standardgangarten berechnet und in dem Speicher gespeichert worden sind. Das Programm schreitet dann weiter zu S1404, in welchem das Verhalten des dynamischen Störungsmodells bis zur Endzeit der Gangart berechnet

wird und die letzte Modellposition  $X_e$  und die letzte Modellgeschwindigkeit  $V_e$  berechnet werden, wobei die ZMP-Parameter, wie in **Fig. 35** illustriert, auf  $c = 1$ ,  $e = 0$ ,  $p$  (ZMP-Wert zur Zeit 0) = 0, ZMP-Werte bei den anderen Haltepunkten = 0, gesetzt werden, während ihre Anfangszustände auf  $x_0 = 0$  und  $v_0 = 0$  gesetzt werden.

[0249] Genauer wird dies getan durch Setzen von  $\Delta c$  (dem ZMP-Muster-Korrekturbetrag; gezeigt in **Fig. 29**) auf 1 und Eingeben des ZMP-Musters, so wie in **Fig. 29** illustriert, in das Modell, um das Verhalten des Modells zu erhalten. Es werden dann die Endzustände des Modells erhalten und die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellposition  $X_e$  relativ zum ZMP-Parameter  $c$  (bezeichnet als  $R(X_e, c)$ ) wird wie folgt berechnet.

$$R(X_e, c) = X_e$$

[0250] Ähnlich wird die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  relativ zum ZMP-Parameter  $c$  wie folgt berechnet.

$$R(V_e, c) = V_e$$

[0251] Das Verhalten des dynamischen Störungsmodells kann durch Diskretisierung des Modells und dann durch Ausführen sequentieller Rechnung berechnet werden oder kann durch Analysis gelöst werden.

[0252] Das Programm schreitet dann weiter zu S1406, in welchem das Verhalten des dynamischen Störungsmodells bis zur Endzeit der Gangart berechnet wird und die letzte Modellposition  $X_e$  und die letzte Modellgeschwindigkeit  $V_e$  berechnet werden, wobei die ZMP-Parameter auf  $c = 0$ ,  $e = 1$ ,  $p = 0$ , ZMP-Werte an den anderen Haltepunkten = 0, gesetzt werden, während ihre Anfangswerte auf  $x_0 = 0$  und  $v_0 = 0$  gesetzt werden.

[0253] Es wird dann die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellposition  $X_e$  relativ zum ZMP-Parameter  $c$  wie folgt berechnet.

$$R(X_e, c) = X_e$$

[0254] Zur selben Zeit wird die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  relativ zum ZMP-Parameter  $c$  wie folgt berechnet.

$$R(V_e, c) = V_e$$

[0255] Das Programm schreitet weiter zu S1408, in welchem das Verhalten des dynamischen Störungsmodells bis zur Endzeit der Gangart berechnet wird und die letzte Modellposition  $X_e$  und die letzte Modellgeschwindigkeit  $V_e$  berechnet werden, wobei der ZMP-Parameter  $c = 0$ ,  $e = 0$ ,  $p = 0$ , ZMP-Werte bei den anderen Haltepunkten = 0, gesetzt werden, während ihre Anfangswerte auf  $x_0 = 1$  und  $v_0 = 0$  gesetzt werden.

[0256] Es wird dann die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellposition  $X_e$  relativ zur ersten Modellposition  $x_0$  wie folgt berechnet.

$$R(X_e, x_0) = X_e$$

[0257] Zur selben Zeit wird die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  relativ zur Anfangsmodellposition  $x_0$  wie folgt berechnet.

$$R(V_e, x_0) = V_e$$

[0258] Das Programm schreitet weiter zu S1410, in welchem das Verhalten des dynamischen Störungsmodells bis zur Endzeit der Gangart berechnet wird und die letzte Modellposition  $X_e$  und die letzte Modellgeschwindigkeit  $V_e$  berechnet werden, wobei die ZMP-Parameter auf  $c = 0$ ,  $e = 0$ ,  $p = 0$ , ZMP-Werte bei den anderen Haltepunkten  $= 0$ , gesetzt werden, während ihre Anfangswerte auf  $x_0 = 0$  und  $v_0 = 1$  gesetzt werden.

[0259] Es wird dann die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellposition  $X_e$  relativ zur Anfangsmodellgeschwindigkeit  $v_0$  wie folgt berechnet.

$$R(X_e, v_0) = X_e$$

[0260] Zur selben Zeit wird die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  relativ zu Anfangsmodellgeschwindigkeit  $v_0$  wie folgt berechnet.

$$R(V_e, v_0) = V_e$$

[0261] Das Programm schreitet weiter zu S1411, in welchem das Verhalten des dynamischen Störungsmodells bis zur Endzeit der Gangart berechnet wird und die letzte Modellposition  $X_e$  und die letzte Modellgeschwindigkeit  $V_e$  berechnet werden, wobei die ZMP-Parameter auf  $c = 0$ ,  $e = 0$ ,  $p = 1$ , ZMP-Werte bei den anderen Haltepunkten  $= 0$ , gesetzt werden, während ihre Anfangswerte auf  $x_0 = 0$  und  $v_0 = 0$  gesetzt werden.

[0262] Es wird dann die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellposition  $X_e$  relativ zum Anfangs-ZMP  $p$  wie folgt berechnet.

$$R(X_e, p) = X_e$$

[0263] Zur selben Zeit wird die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  relativ zum Anfangs-ZMP  $p$  (bezeichnet als  $R(V_e, p)$ ) wie folgt berechnet.

$$R(V_e, p) = V_e$$

[0264] Das Programm schreitet weiter zu S1412, in welchem auf Grundlage der so erhaltenen Empfind-

lichkeiten eine 2\*2-Matrix erzeugt wird, deren Element in der ersten Reihe und ersten Spalte  $R(X_e, c)$  ist, deren Element in der ersten Reihe und zweiten Spalte  $R(X_e, e)$  ist, deren Element in der zweiten Reihe und ersten Spalte  $R(V_e, c)$  und deren Element in der zweiten Reihe und zweiten Spalte  $R(V_e, e)$  ist.

[0265] Das Programm schreitet dann weiter zu S1414, in welchem die inverse Matrix davon berechnet wird. In der inversen Matrix ist das Element der ersten Reihe und ersten Spalte die partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $\underline{c}$  relativ zur letzten Modellposition  $X_e$  (bezeichnet als  $R(c, X_e)$ ), das Element der zweiten Reihe und ersten Spalte ist die partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $e$  relativ zur letzten Modellposition  $X_e$  (bezeichnet als  $R(e, X_e)$ ), das Element der ersten Reihe und zweiten Spalte ist die partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $\underline{c}$  relativ zur letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  (bezeichnet als  $R(c, V_e)$ ) und das Element der zweiten Reihe und zweiten Spalte ist die partielle Differentialempfindlichkeit des Parameters  $\underline{e}$  relativ zur letzten Modellgeschwindigkeit  $\underline{e}$  (bezeichnet als  $R(e, V_e)$ ).

[0266] Das Programm schreitet dann weiter zu S1416, in welchem der Zeitgeber auf Null zurückgesetzt und gestartet wird, weiter zu S1422, über S1418, S1420, in welchen bestimmt wird, ob die Gangart zu wechseln ist. Ist das Ergebnis negativ, so schreitet das Programm weiter zu S1432. Ist das Ergebnis zustimmend, so schreitet das Programm andererseits zu S1428, über S1424, S1426, in welchen das Gangartmischen ausgeführt wird.

[0267] Dies wird unter Bezugnahme auf das Flussdiagramm von **Fig. 38** erläutert, welches die Unteroutine der Prozeduren zeigt. Das Programm startet bei S1500, in welchem die Parameter der Mischgangart unter Verwendung irgendeiner Methode der vorhergehenden Ausführungsformen erzeugt werden. Zu dieser Zeit wird von den Standardgangarten eine als die Basisgangart ausgewählt, deren Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers nahe den geforderten Werten sind. Dann werden unter Ausschluss der Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers von den direkt bestimmten Parametern die Parameter der Mischgangart erzeugt oder berechnet. Das Programm schreitet dann weiter zu S1502, in welchem die Differenzen  $\Delta x_0$ ,  $\Delta v_0$ ,  $\Delta X_e$ ,  $\Delta V_e$  zwischen den Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers der Mischgangart und den geforderten Werten berechnet werden.

[0268] Das Programm schreitet dann weiter zu S1504, in welchem die Endposition und -geschwindigkeit  $\Delta X_{se}$ ,  $\Delta V_{se}$  wie folgt berechnet werden, indem die erste Modellposition und -geschwindigkeit auf  $\Delta x_0$ ,  $\Delta v_0$  gesetzt werden, während der ZMP auf 0 gesetzt wird.

$$\Delta X_{se} = R(X_e, x_0) \cdot \Delta x_0 + R(X_e, v_0) \cdot \Delta v_0$$

$$\Delta V_{se} = R(V_e, x_0) \cdot \Delta x_0 + R(V_e, v_0) \cdot \Delta v_0$$

[0269] Das Programm schreitet weiter zu S1506, in welchem die ZMP-Parameter-Korrekturbeträge  $\Delta c$ ,  $\Delta e$  wie folgt berechnet werden.

$$\Delta c = R(c, X_e) \cdot (\Delta X_e + \Delta X_{se}) + R(c, V_e) \cdot (\Delta V_e + \Delta V_{se})$$

$$\Delta e = R(e, X_e) \cdot (\Delta X_e + \Delta X_{se}) + R(e, V_e) \cdot (\Delta V_e + \Delta V_{se})$$

[0270] Das Programm schreitet weiter zu S1508, in welchem die ZMP-Parameter  $\underline{c}$ ,  $\underline{e}$  unter Verwendung derselben Gleichung, welche in S1208 verwendet wurde, berechnet werden. Das Programm schreitet dann weiter zu S1430, S1432 und zu S1600 sowie S1602 in einem Flussdiagramm von **Fig. 39**, in welchem ähnliche Prozeduren wie in der vierten Ausführungsform ausgeführt werden. Das Programm schreitet dann weiter zu S1604, in welchem der Korrekturbetrag der ZMP-Trajektorie berechnet wird. Dieser ist gleich dem in **Fig. 28** illustrierten Muster, wenn es um  $c = \Delta c$ ,  $e = \Delta e$  verändert wird und die ZMP-Werte bei den Haltepunkten 0 sind.

[0271] Das Programm schreitet weiter zu S1606, in welchem durch Setzen der Anfangsmodellposition und -geschwindigkeit gemäß  $x_{mdl}(0) = \Delta x_0$  und  $v_{mdl}(0) = \Delta v_0$  und ZMP $_{mdl}$  = dem vorgenannten ZMP-Trajektorien-Korrekturbetrag und durch Eingeben dieser in das Modell das Verhalten des Modells durch sequentielle Rechnungen bestimmt wird. Mit anderen Worten werden die aktuelle (zur Zeit  $t$ ) Modellposition und -geschwindigkeit unter Verwendung einer Gleichung eines diskretisierten Modells auf Grundlage der vorhergehenden (zur Zeit  $t - \Delta t$ ) Modellposition und -geschwindigkeit sowie auf Grundlage des aktuellen (zur Zeit  $t$ ) ZMP-Trajektorien-Korrekturbetrags berechnet werden. In dem ersten Steuer/regelzyklus werden die aktuelle Modellposition und -geschwindigkeit auf  $x_{mdl}(0) = \Delta x_0$  und  $v_{mdl}(0) = \Delta v_0$  gesetzt. Als diskretisiertes Modell ist es möglich, ein Modell zu verwenden, welches in einer Matrixform ausgeführt ist, die allgemein auf dem Gebiet moderner Steuer/Regel-Theorie verwendet wird.

[0272] Das Programm schreitet dann weiter zu S1608, in welchem die Modellposition zur gemischten Körperposition als ein in der folgenden Gleichung gezeigter Korrekturbetrag addiert wird und die Sollposition des Körpers somit bestimmt wird.

$$x(x) = x_{mix}(k) + x_{mdl}(k\Delta t)$$

[0273] Hierbei sind  $x(k)$ : die Sollposition des Körpers;  $x_{mix}(k)$ : das  $k$ -te Datum in den Zeitreihendaten der Körpertrajektone der Mischgangart und  $x_{mdl}(k\Delta t)$ : die Modellposition zur Zeit  $k\Delta t$ .

[0274] Bei einer Konfiguration in der vorstehenden Weise kann das System in der fünften Ausführungsform dieselben Vorteile aufweisen wie das der vierten Ausführungsform.

[0275] Genauer gesagt ist, da das lineare umgekehrte Pendelmodell verwendet wird, die benötigte Speicherkapazität (ROM **84**) geringer und die Körpertrajektorienstörung kann auf Echtzeitbasis durch sequentielle Rechnungen usw. erhalten werden. Ferner ist es möglich, auf einfache Weise eine strenge Lösung der Modellgleichung zu erhalten und auf Grundlage der strengen Lösung ist es möglich, das zukünftige Verhalten ohne Schwingigkeiten vorherzusagen.

[0276] Es sollte bemerkt werden, dass, obwohl die Empfindlichkeiten der letzten Körperposition und -geschwindigkeit relativ zu den ZMP-Parametern von den strengen Lösungen erhalten werden können, die Empfindlichkeiten vorzugsweise vorher erhalten und in dem Speicher gespeichert werden sollten, um die Rechenzeit zu reduzieren, da die strengen Lösungen Berechnungen exponentieller Funktionen beinhalten. [0277] **Fig. 40** ist ein Flussdiagramm, welches die Funktionsweise des Systems gemäß der sechsten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt.

[0278] Ist die Änderung der Trägheitskraft des freien Beins vernachlässigbar oder, mit anderen Worten, ändert sich der ZMP genügend, so ist es wie oben erwähnt, selbst dann, wenn die Anfangsposition des Fußes des freien Beins oder die Endposition des Fußes des freien Beins gestört ist, möglich, die Gangarterzeugung zu vereinfachen. Die sechste Ausführungsform zielt darauf ab, dies zu erreichen.

[0279] In der in dieser Beschreibung definierten Gangart ist die Endzeit einer Gangart der Moment, in welchem das freie Bein aufsetzt. Der ZMP ist noch immer auf die Bodenkontaktfläche des Fußes des Unterstützungsbeins gesetzt. Dementsprechend muss der ZMP-Parameter nicht variiert werden, wenn die Endposition des Fußes des freien Beins verändert wird, vorausgesetzt die Trägheitskraft, welche durch die Änderung der Endposition des Fußes des freien Beins verursacht wird, ist vernachlässigbar. Da jedoch die Anfangsposition des ZMP-Musters allgemein auf den Zeh der Anfangsposition und -orientierung des Fußes des freien Beins gesetzt ist, sollte dann, wenn die Anfangsposition des freien Beins verändert wird, das ZMP-Muster daher in Antwort darauf verändert werden.

[0280] Unter Heranziehung der ZMP-Parameteränderung aufgrund der Änderung der Anfangsposition des Fußes des freien Beins als ein Beispiel wird die Funktionsweise nun erläutert, wobei sich auf den Unterschied gegenüber der der fünften Ausführungsform konzentriert wird.

[0281] Das Programm beginnt in S1700 des Flussdiagramms von **Fig. 40** und schreitet weiter zu S1710, in welchem ähnliche Prozeduren wie die der fünften Ausführungsform ausgeführt werden, und dann weiter zu S1712. Die folgenden Prozeduren sind in der sechsten Ausführungsform in Antwort auf die ZMP-Parameterveränderung hinzugefügt, um die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts zu erfüllen.

[0282] Genauer wird in S1712 das Verhalten des dynamischen Störungsmodells bis zur Endzeit der Gangart berechnet und die letzte Modellposition  $X_e$  und die letzte Modellgeschwindigkeit  $V_e$  werden berechnet, wobei die ZMP-Parameter auf  $c = 0$ ,  $e = 0$ ,  $p = 1$ , ZMP-Werte an den anderen Haltepunkten  $= 0$ , gesetzt werden, während ihre Anfangswerte auf  $x_0 = 0$  und  $v_0 = 0$  gesetzt werden, wie in **Fig. 41** illustriert ist.

[0283] Es wird dann die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellposition  $X_e$  relativ zum ZMP-Parameter  $p$  wie folgt berechnet.

$$R(X_e, p) = X_e$$

[0284] Zur selben Zeit wird die partielle Differentialempfindlichkeit der letzten Modellgeschwindigkeit  $V_e$  relativ zum ZMP-Parameter  $p$  wie folgt berechnet.

$$R(V_e, p) = V_e$$

[0285] Das Programm schreitet weiter zu S1728, in welchem ähnliche Prozeduren wie die der fünften Ausführungsform ausgeführt werden, und dann zu S1730, in welchem das Gangartmischen ausgeführt wird. Genauer schreitet das Programm, wie im Flussdiagramm von **Fig. 42** gezeigt, weiter zu S1800, in welchem die Parameter der Mischgangart unter Verwendung irgendeiner Methode der vorhergehenden Ausführungsformen erzeugt werden. Zu dieser Zeit wird von den Standardgangarten eine als die Basisgangart ausgewählt, welche bezüglich der Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers und der Anfangs- und Endpositionen und -orientierungen des Fußes des freien Beins in der Nähe liegt.

[0286] Wenn die Basisgangart einmal ausgewählt ist, wird die Mischgangart in der selben Weise wie bei den vorhergehenden Ausführungsformen unter Ausschluss der Anfangs- und Endpositionen des Körpers sowie der Anfangs- und Endpositionen des Fußes des freien Beins von den direkt bestimmten Parametern erzeugt. Demzufolge sind die Anfangs- und Endpositionen und -geschwindigkeiten des Körpers sowie die Anfangs- und Endpositionen des Fußes des freien Beins für die Mischgangart dieselben wie die für die Basisgangart.

[0287] Das Programm schreitet weiter zu S1806, über S1802 und S1804, in welchen die Differenz zwischen der geforderten Anfangsposition des Fußes des freien Beins und der Anfangsposition des Fußes des freien Beins der Mischgangart berechnet und mit  $\Delta p$  bezeichnet wird. Das Programm schreitet dann weiter zu S1808, in welchem die Endposition und -geschwindigkeit  $\Delta X_{pe}$ ,  $\Delta V_{pe}$  unter Verwendung der folgenden Gleichungen berechnet werden, wobei der erste Modell-ZMP auf  $\Delta p$  und ZMP-Werte an den anderen Haltepunkten auf 0 gesetzt werden.

$$\Delta X_{pe} = R(X_e, p) \cdot \Delta p$$

$$\Delta V_{pe} = R(V_e, p) \cdot \Delta p$$

[0288] Das Programm schreitet weiter zu S1810, in welchem die ZMP-Korrekturbeträge  $\Delta c$ ,  $\Delta e$  unter Verwendung der folgenden Gleichungen berechnet werden.

$$\Delta c = R(c, X_e) \cdot (\Delta X_e + \Delta X_{se} + \Delta X_{pe}) + R(c, V_e) \cdot (\Delta V_e + \Delta V_{se} + \Delta V_{pe})$$

$$\Delta e = R(e, X_e) \cdot (\Delta X_e + \Delta X_{se} + \Delta X_{pe}) + R(e, V_e) \cdot (\Delta V_e + \Delta V_{se} + \Delta V_{pe})$$

[0289] Das Programm schreitet dann weiter zu S1732 im Flussdiagramm von **Fig. 40**, in welchem die vorbenannten Parameter der gemischten Gangart für die Sollgangartparameter ersetzt werden. Die in S1812 erhaltenen Werte werden für die ZMP-Parameter  $c$ ,  $e$  ersetzt. Die geforderten Werte werden für die Parameter der Anfangs- und Endposition des Fußes des freien Beins ersetzt.

[0290] Das Programm schreitet dann weiter zu S1734, wie dies in dem Flussdiagramm von **Fig. 34** gezeigt ist, in welchem in S1900 und in S1902 dieselben Prozeduren ausgeführt werden wie in der fünften Ausführungsform. Mit diesen Prozeduren werden Fußtrajektorien, welche die Anforderungen für die Anfangs- und Endpositionen des Fußes des freien Beins erfüllen, sowie auch die korrigierte ZMP-Trajektorie erhalten. Das Programm schreitet dann weiter zu S1904, in welchem der Korrekturbetrag für die ZMP-Trajektorie berechnet wird. Dieser ist ein in **Fig. 44** illustriertes Muster, in welchem dessen Werte auf  $c = \Delta c$ ,  $e = \Delta e$ ,  $p = \Delta p$  und die ZMP-Werte an den anderen Haltepunkten auf 0 gesetzt sind.

[0291] Der Rest der sechsten Ausführungsform ist gleich wie bei der fünften Ausführungsform.

[0292] Mit einer Konfiguration in der vorstehenden Weise weist das System in der sechsten Ausführungsform dieselben Vorteile auf wie das in der vierten oder fünften Ausführungsform. Zusätzlich kann die Speicherkapazität weiter reduziert werden, da Standardgangarten mit unterschiedlicher Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers nicht im Speicher gespeichert werden müssen.

[0293] **Fig. 45** ist ein Blockdiagramm ähnlich **Fig. 3**, zeigt jedoch die Konfiguration eines Systems gemäß der siebten Ausführungsform der Erfindung. Die siebte Ausführungsform unterscheidet sich hinsichtlich der Berechnung der horizontalen Körperposition.

[0294] In der siebten Ausführungsform werden die Fussposition und Orientierung, der ZMP und die Körperhöhe  $Z$  zur aktuellen Zeit (Zeit  $t$ ) und die erhaltenen Zustände (einschließlich Körperposition und -geschwindigkeit) zur vorhergehenden Zeit (Zeit  $t - \Delta t$ ) in ein Roboterbewegungsmodell eingegeben (welches Dynamik, Kinematik und verschiedene Zwangsbedingungen umfasst), um den aktuellen Wert (Momentanwerte) der horizontalen Körperpositionskoordinaten ( $X$ ,  $Y$ ) zu berechnen.

[0295] Genauer werden in der siebten Ausführungsform S2000 bis S2016, welche in einem Flussdiagramm von **Fig. 46** gezeigt sind, ähnlich der zweiten Ausführungsform ausgeführt. Das Programm schreitet weiter zu S2100, dann zu S2104, wie in einem Flussdiagramm von **Fig. 47** gezeigt, und kehrt dann zu den in dem Flussdiagramm von **Fig. 46** gezeigten Prozeduren zurück. Das Programm schreitet dann von S2018 zu S2022 und dann zu S2200 und weiter, wie in einem Flussdiagramm von **Fig. 48** gezeigt, und dann zu S2206, in welchem die Körpertrajektorie der Mischgangart (Soll-Körpertrajektorie) durch sequentielle Berechnung bestimmt wird, derart, dass der ZMP, welcher aus der Bewegung des Körpers (Sollkörper) und der Füße in der Mischgangart dynamisch berechnet wird, mit dem bestimmten ZMP (welcher von den Parametern der Mischgangart bestimmt wird) übereinstimmt.

[0296] Im Anfangszustand der Gangart werden geeignet gesetzte Parameter der Anfangsposition und -geschwindigkeit des Körpers als Körperposition und -geschwindigkeit verwendet. Es werden somit Gangarten für einen einzelnen Gehschritt durch sequentielles Berechnen von Werten beginnend mit den Anfangsparametern für Körper und Geschwindigkeit erzeugt werden.

[0297] Diese Methode ist dahingehend nachteilig, dass der Umfang der Rechnung vergrößert wird und die Endposition und -geschwindigkeit des Körpers dazu tendiert, von den geforderten Werten leicht abzuweichen, sie ist jedoch dahingehend vorteilhaft, dass sie die Bedingung des dynamischen Gleichgewichts in einem strengen Sinn erfüllen kann.

[0298] In der siebten Ausführungsform können die aktuelle Körperhöhe und horizontale Körperposition alternativ so bestimmt werden, dass sie die Bedingungen des dynamischen Gleichgewichts und die Zwangsbedingungen zum Bestimmen der Körperhöhe gleichzeitig erfüllen. In der vorstehenden Ausführungsform wird die Körperhöhe auf Grundlage der vorhergehenden horizontalen Körperposition berechnet, um die Rechnung zu verkürzen, wobei angenommen wird, dass die Körperhöhe sich innerhalb einer kurzen Periode sich nicht stark ändern würde.

[0299] Erste bis siebte Ausführungsformen sind so konfiguriert, dass ein System bereitgestellt wird zum Erzeugen einer Gangart eines auf Beinen beweglichen Roboters, welcher wenigstens einen Körper **24** und eine Mehrzahl von Beingelenken **2**, welche jeweils durch ein Gelenk **10R(L)**, **12R(L)**, **14R(L)** mit dem Körper verbunden sind, welches umfasst: Standardgangartspeichermittel (S10, usw.) zum Speichern einer Mehrzahl von Standardgangarten für wenigstens einen Gehschritt in einem Speicher, wobei jede einen Satz von Parametern einschließlich einem sich auf eine Bodenreaktionskraft beziehenden Parameter umfassen, Gangartanforderungsmittel (S24 usw.) zum Erstellen einer Gangartanforderung sowie Gangarterzeugungsmittel (S26 bis S30, S100 bis S106, S200 bis S206, usw.) zum Erzeugen einer an-

genäherten Gangart, welche die Gangartanforderung durch Auswählen einer oder einer Mehrzahl von Standardgangarten in Antwort auf die Gangartanforderung und durch Ausführen einer Näherung auf Grundlage der ausgewählten Standardgangart oder der Gangarten erfüllt.

[0300] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die genäherte Gangart durch Berechnen eines gewichteten Mittelwerts der ausgewählten Gangarten (S100 bis S106, S200 bis S206, usw.) erzeugen.

[0301] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart unter Verwendung einer Parameterempfindlichkeit der gewählten Gangart oder Gangarten erzeugen (S500, S600 bis S604, S700 bis S706).

[0302] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart durch Berechnen eines gewichteten Mittelwerts der ausgewählten Gangarten und durch Verwenden einer Parameterempfindlichkeit der ausgewählten Gangart oder Gangart erzeugen (S800, S900 bis S906, S1000 bis S1006).

[0303] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel Speichermittel (S500, S800, usw.) enthalten, zum Bestimmen eines Änderungsbetrags eines Parameters relativ zu einem Einheitsänderungsbetrag eines anderen Parameters in wenigstens einer der Standardgangarten als Parameterempfindlichkeit der ausgewählten Gangart und zum Speichern der Parameterempfindlichkeit im Speicher, und die angenäherte Gangart unter Verwendung der gespeicherten Parameterempfindlichkeit erzeugen.

[0304] Es ist so konfiguriert, dass die Gangartmittel Beschreibungsmittel enthalten (S1104 bis S1114), zum Beschreiben einer Beziehung der Störung eines Parameters relativ zu dem sich auf die Bodenreaktionskraft beziehenden Parameter in den Standardgangarten, und die angenäherte Gangart auf Grundlage der beschriebenen Beziehung der Störung korrigiert, um Gangarten zu erzeugen, welche die Gangartanforderung in einer solchen Weise erfüllen, dass zumindest Verlagerungen und Geschwindigkeiten in den erzeugten Gangarten an einer Grenze der Gangarten kontinuierlich sind (S1128, S1200 bis S1208, S1130, S1132, S1300 bis S1304, usw.).

[0305] Es ist so konfiguriert, dass die Störung des einen Parameters eine Störung einer horizontalen Körperposition ist.

[0306] Es ist so konfiguriert, dass die Beziehung durch ein lineares Modell beschrieben ist.

[0307] Es ist so konfiguriert, dass die Beziehung durch ein umgekehrtes Pendelmodell beschrieben ist.

[0308] Es ist so konfiguriert, dass die Beziehung durch tabellierte Zeitreihendaten beschrieben ist.

[0309] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart ohne Berücksichtigung des Parameters (d. h. unabhängig von dem Parameter) erzeugt, falls der Parameter unter-

halb einer vorbestimmten Bedingung liegt (S1730, S1800 bis S1812).

[0310] Es ist so konfiguriert, dass die Gangarterzeugungsmittel Berechnungsmittel für Gelenkwinkelkommandos (S302) aufweisen, zum Berechnen eines Gelenkwinkelkommandos des Roboters auf Grundlage der erzeugten Gangart, und Gelenksteuer/regelmittel (S306) aufweisen, zum Steuern/Regeln des Gelenks des Roboters in einer solchen Weise, dass er dem berechneten Gelenkwinkelkommando folgt.

[0311] Es ist so konfiguriert, dass die Berechnungsmittel für das Gelenkwinkelkommando Detektionsmittel (S300, S400 bis S404) zum Detektieren eines Zustands des Roboters sowie Korrekturmittel (S406, S408, S304) zum Korrigieren einer Position und einer Haltung des Roboters in Antwort auf den detektierten Zustand umfasst und das Gelenkwinkelkommando so berechnet, dass die korrigierte Position und die Orientierung bewirkt werden.

[0312] In der ersten bis siebten Ausführungsform sollte die Näherung nicht auf die offenbarte beschränkt sein. Vielmehr werden verschiedene Modifikationen oder Abwandlungen möglich sein.

[0313] In der ersten bis siebten Ausführungsform wird die Körperposition repräsentiert durch eine Koordinate eines Bezugspunkts des Körpers **24**, betrachtet im Koordinatensystem, welches in den Bodenkontaktpunkt des Unterstützungsbeins gesetzt ist. Der Referenzpunkt sollte in der Links-und-Rechts-Richtung in die Mitte des Körpers **24** gesetzt werden. Bezüglich der Vor-und-Rück-Richtung kann der Referenzpunkt unter Verwendung irgendeiner der folgenden Methoden gesetzt werden.

[0314] Methode 1): Setzen des Referenzpunkts in den Schwerpunkt des Körpers (verwendet in der ersten bis siebten Ausführungsform).

[0315] Methode 2): Setzen des Referenzpunkts in eine Position, welche mit dem Massenmittelpunkt des Roboters übereinstimmt, wenn der Roboter aufrecht steht.

[0316] Methode 3): Setzen des Referenzpunkts in einen geeigneten Punkt durch Versuch- und-Fehler.

[0317] Die Methoden würden sich nicht unterscheiden, wenn die Orientierung des Körpers während des Gehens konstant ist. Wenn sich jedoch die Körperorientierung während des Gehens ändert, so wie beim Drehen, so wäre ein Fehler (Näherungsfehler) in Abhängigkeit von der Position, in welcher der Referenzpunkt gesetzt ist, unterschiedlich. Genauer illustriert **Fig. 49** die Fälle, in welchen der Referenzpunkt in die Mitte des Körpers gesetzt ist und der Referenzpunkt im Blatt nach rechts geschoben ist. Nimmt man eine Situation an, in welcher der Körper um den Referenzpunkt gedreht ist, so wird verstanden werden, dass die Körperpositionen voneinander verschieden sind, wenn der Referenzpunkt in der Körpermitte ist oder wenn der Referenzpunkt nahe der Körpervorderseite ist.

[0318] Die Erzeugung einer Mischgangart (angeforderte Gangart) wurde unter Heranziehung eines Beispiels des Mischens von Gangarten mit unterschiedlichen Drehwinkeln beschrieben. Das Gangartmischen ist somit eine Art Näherung. Die Gangart wird jedoch, wie oben erwähnt, leicht in Abhängigkeit von der Weise des Setzens des Referenzpunkts variieren und somit wird die Genauigkeit der Näherung relativ zum dynamischen Gleichgewichtszustand variieren.

[0319] Der Referenzpunkt soll demzufolge so gesetzt werden, dass der Fehler relativ zum dynamischen Gleichgewichtszustand so klein wie möglich ist. Welche der Setzmethoden optimal ist oder welche der Setzmethoden geringen Einfluss hat, hängt von der Struktur oder der Natur des Gehens des Roboters ab.

[0320] Um die Genauigkeit bezüglich der dynamischen Gleichgewichtsbedingung zu steigern, ist es alternativ möglich, statt der tabellierten Zeitreihendaten der Körperposition tabellierte Zeitreihendaten des Massenmittelpunkts des Roboters zu verwenden. Dabei wird, da die Roboterhaltung so bestimmt werden muss, dass der Mittelpunkt der Robotermitte mit einer vorgesehenen Position übereinstimmt, der Umfang der Rechnung um einen signifikanten Betrag erhöht werden.

[0321] In den vorstehenden Ausführungsformen wurde die Beschleunigung nicht in den Gangartparametern beschrieben. Es ist unnötig zu erwähnen, dass erzeugte Gangarten noch glatter werden, wenn die Beschleunigung an der Grenze von Gangarten kontinuierlich eingerichtet wird.

[0322] Obwohl in den vorstehenden Ausführungsformen die vorliegende Erfindung unter Bezugnahme auf einen zweifüßigen Roboter beschrieben wurde, kann die vorliegende Erfindung auf andere auf Beinen bewegliche Roboter angewendet werden.

[0323] Gemäß der bevorzugten Ausführungsform wird es möglich, Gangarten einschließlich der Bodenreaktionskraft frei und auf Echtzeitbasis zu erzeugen und einen Schritt oder einen Drehwinkel wie gewünscht zu bewirken. Ferner wird es möglich, die Verlagerungen und Geschwindigkeiten verschiedener Roboterabschnitte an der Grenze der erzeugten Gangarten kontinuierlich zu gestalten. Außerdem wird es möglich, das Gehen eines auf Beinen beweglichen Roboters auf Grundlage der auf Echtzeitbasis erzeugten Gangarten zu steuern/zu regeln.

## Patentansprüche

1. System zum Erzeugen einer Gangart eines auf Beinen beweglichen Roboters (**1**), welcher wenigstens einen Körper (**24**) und eine Mehrzahl von Beingelenken (**2**) aufweist, die jeweils mit dem Körper über ein Gelenk (**10R(L)**), **12R(L)**, **14R(L)**) verbunden sind, umfassend:

a. Standardgangartspeichermittel (S10, S12), um in einem Speicher eine Mehrzahl von Standardgangarten für mindestens einen Gehschritt zu speichern,

wobei jede einen Satz von Gangartparametern, einschließlich einem sich auf eine Bodenreaktionskraft beziehenden Kraftparameter, umfasst; **dadurch gekennzeichnet**, dass das System ferner umfasst:

b. Gangartanforderungsmittel (S24) zum Erstellen einer Anforderung für eine Gangart; und  
 c. Gangarterzeugungsmittel (S26–S30, S100–S106, S200–S206) zum Erzeugen einer angenäherten Gangart, welche der Gangartanforderung genügt, indem eine oder eine Mehrzahl der Standardgangarten in Antwort auf die Gangartenanforderung ausgewählt wird und indem eine Annäherung von wenigstens einem der Gangartparameter der ausgewählten Standardgangart oder Gangarten durchgeführt wird.

2. System nach Anspruch 1, wobei die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart durch Berechnen eines gewichteten Mittelwertes von wenigstens einem der Gangartparameter der ausgewählten Gangarten (S100–S106, S200–S206) erzeugen.

3. System nach Anspruch 1, wobei die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart unter Verwendung einer Parameterempfindlichkeit von einem der Gangartparameter auf einen anderen der Gangartparameter der ausgewählten Gangarten (S516–S520, S600–S604, S700–S706) erzeugen.

4. System nach Anspruch 1, wobei die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart durch Berechnen eines gewichteten Mittelwertes von wenigstens einem der Gangartparameter der ausgewählten Gangarten und unter Verwendung einer Parameterempfindlichkeit von einem der Gangartparameter auf einen anderen der Gangartparameter der ausgewählten Gangart oder Gangarten (S816–S820, S900–S906, S1000–S1006) erzeugen.

5. System nach Anspruch 3 oder 4, wobei die Gangarterzeugungsmittel umfassen:

d. Speichermittel (S500, S800) zum Bestimmen eines Änderungsbetrags bei einem Parameter relativ zu einem Einheitsänderungsbetrag bei einem anderen Parameter in wenigstens einer der Standardgangarten als die Parameterempfindlichkeit der ausgewählten Gangart und zum Speichern der Parameterempfindlichkeit im Speicher; und die angenäherte Gangart unter Verwendung der gespeicherten Parameterempfindlichkeit erzeugen.

6. System nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Gangarterzeugungsmittel umfassen:

e. Beschreibungsmittel (S1104–S1114) zum Beschreiben einer Abweichungsbeziehung von einem der Gangartparameter relativ zu dem sich auf eine Bodenreaktionskraft beziehenden Kraftparameter in den Standardgangarten; und die angenäherte Gangart basierend auf der be-

schriebenen Abweichungsbeziehung korrigieren, um Gangarten zu erzeugen, welche der Gangartanforderung derart genügen, dass die Verlagerungen oder/und die Geschwindigkeiten in den erzeugten Gangarten an einer Grenze der Gangarten (S1128, S1200–S1208, S1130, S1132, S1300–S1304) kontinuierlich ist.

7. System nach Anspruch 6, wobei die Abweichung des einen der Gangartparameter eine Abweichung einer horizontalen Körperposition ist.

8. System nach Anspruch 6 oder 7, wobei die Beziehung durch ein lineares Modell beschrieben wird.

9. System nach Anspruch 8, wobei die Beziehung durch ein umgekehrtes Pendelmodell beschrieben wird.

10. System nach Anspruch 6 oder 7, wobei die Beziehung durch tabellierte Zeitreihendaten beschrieben wird.

11. System nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Gangarterzeugungsmittel die angenäherte Gangart unter Ausschluss des sich auf eine Bodenreaktionskraft beziehenden Kraftparameters erzeugen, wenn der sich auf eine Bodenreaktionskraft beziehenden Kraftparameter unter einem vorbestimmten Zustand (S1730, S1800–S1812) liegt.

12. System nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei die Gangarterzeugungsmittel umfassen:

f. Gelenkwinkelanweisungsberechnungsmittel (S302) zum Berechnen einer Gelenkwinkelanweisung des Roboters basierend auf der erzeugten Gangart; und

g. Gelenksteuer/regelmittel (S306) zum Steuern/Regeln des Gelenks des Roboters, derart, dass er der berechneten Gelenkwinkelanweisung folgt.

13. System nach Anspruch 12, wobei die Gelenkwinkelanweisungsberechnungsmittel umfassen:

h. Erfassungsmittel (S300, S400–S404) zum Erfassen eines Zustands des Roboters; und

i. Korrekturmittel (S304, S406, S408) zum Korrigieren einer Position und einer Haltung des Roboters in Antwort auf den erfassten Zustand;

und die Gelenkwinkelanweisung so berechnen, dass die korrigierte Position und die Haltung bewirkt werden.

Es folgen 38 Blatt Zeichnungen

FIG.1

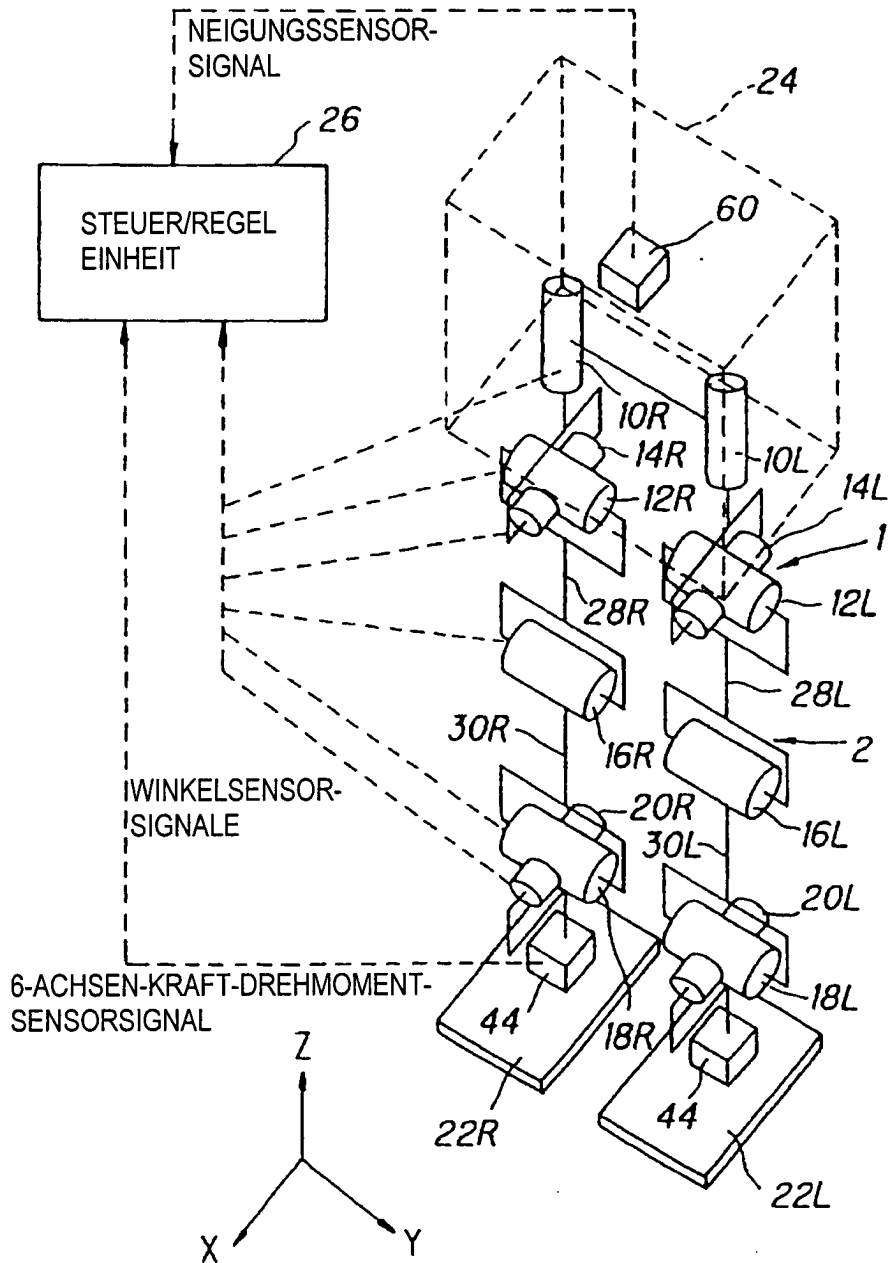


FIG.2

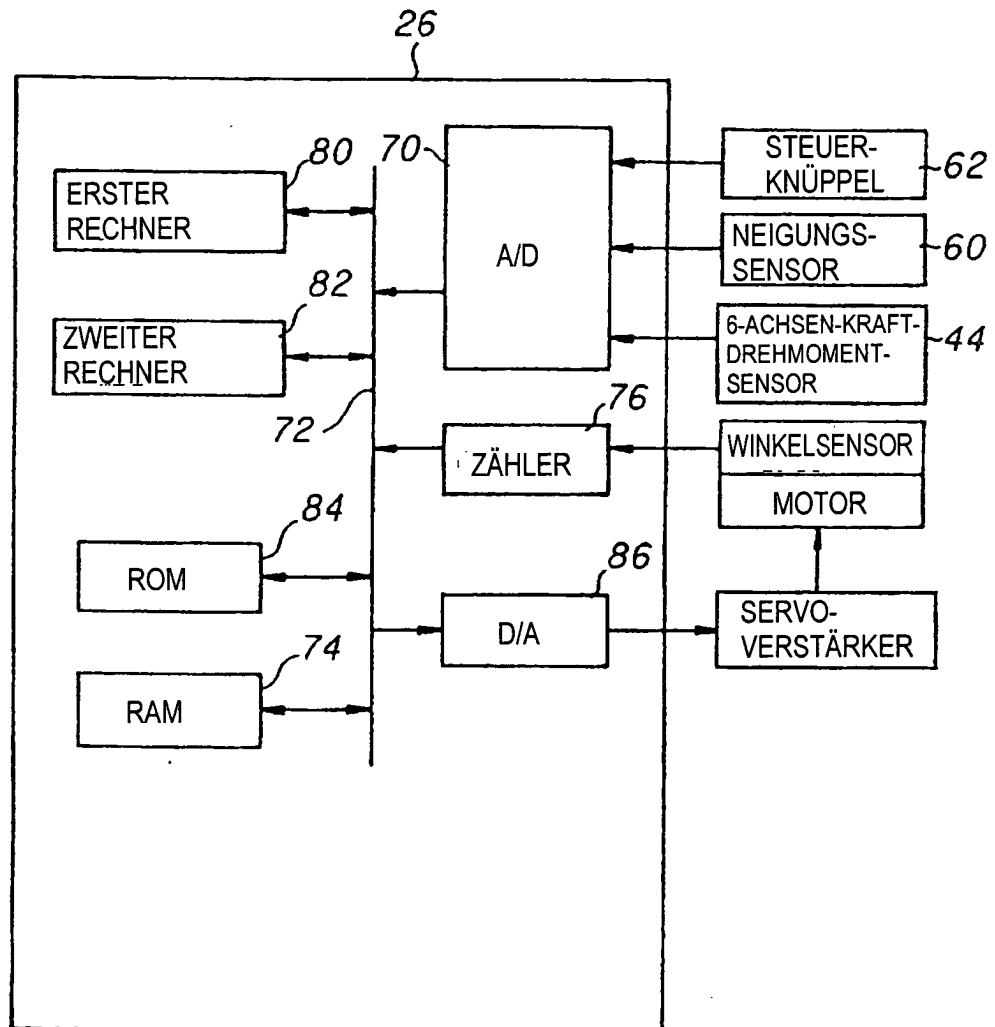


FIG.3

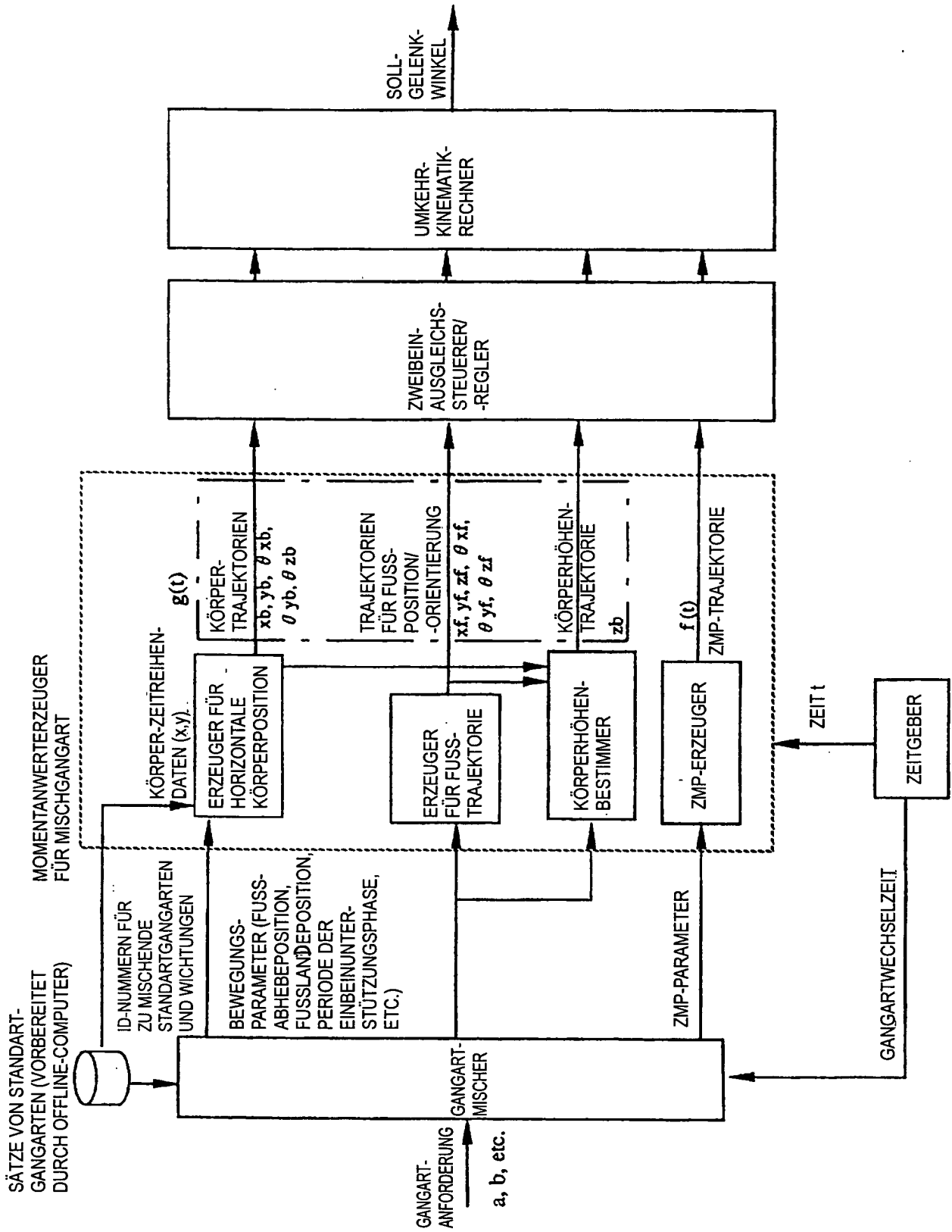


FIG. 4

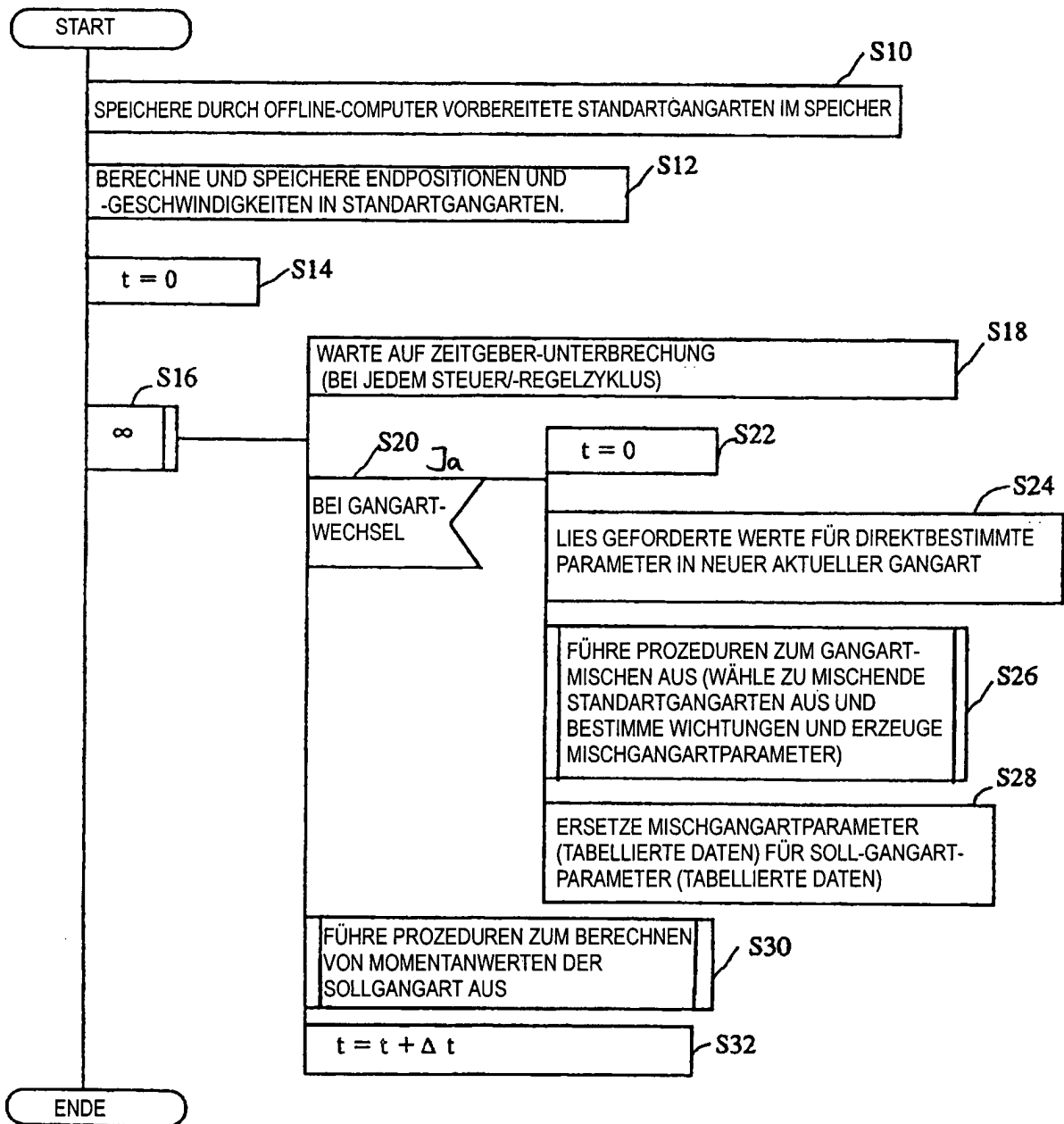


FIG. 5

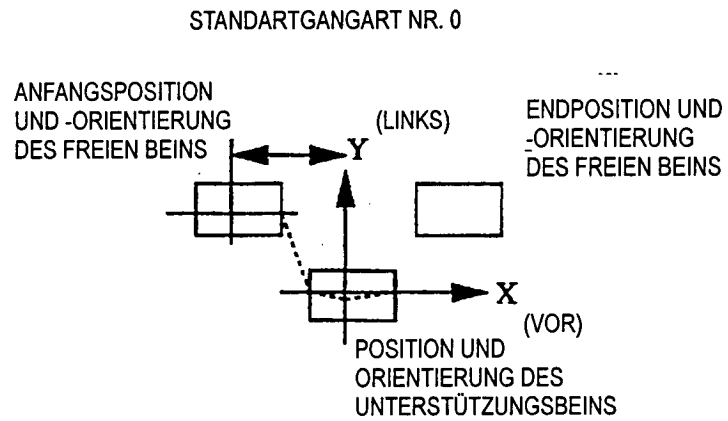


FIG. 6

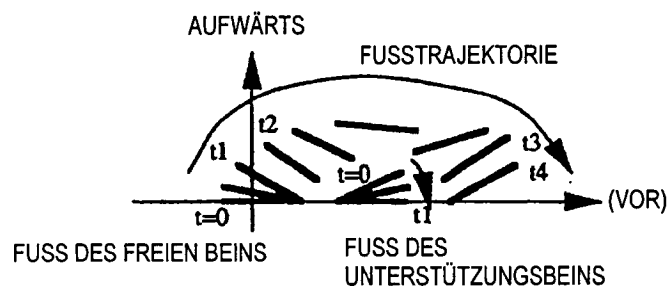


FIG. 7

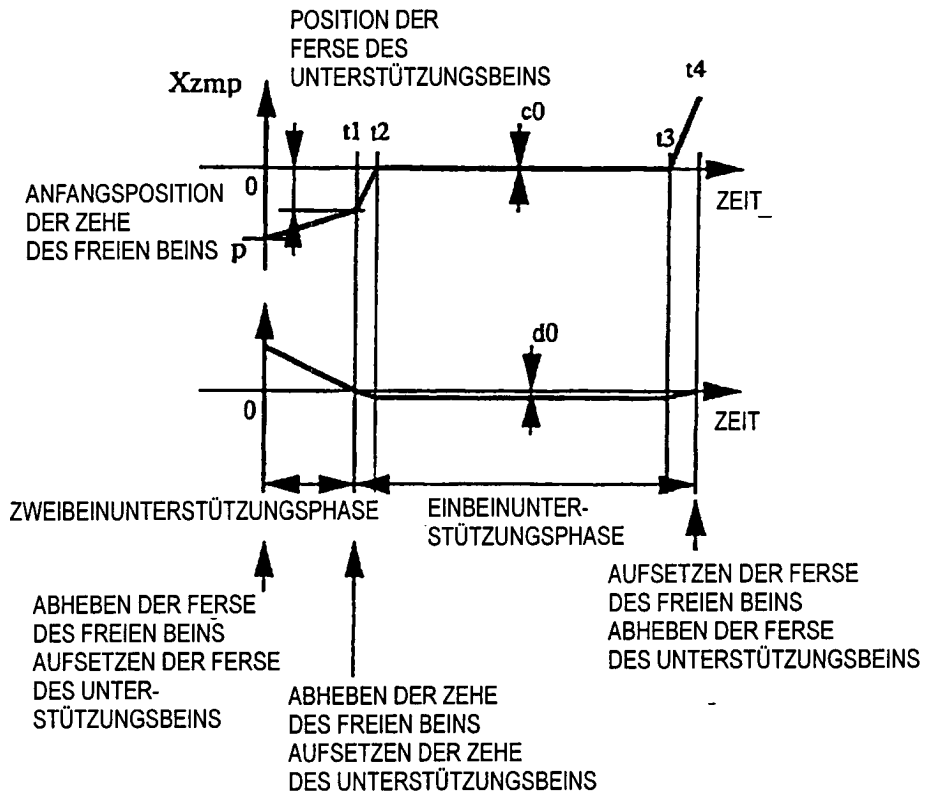


FIG. 8

STANDARTGANGART NR. 1

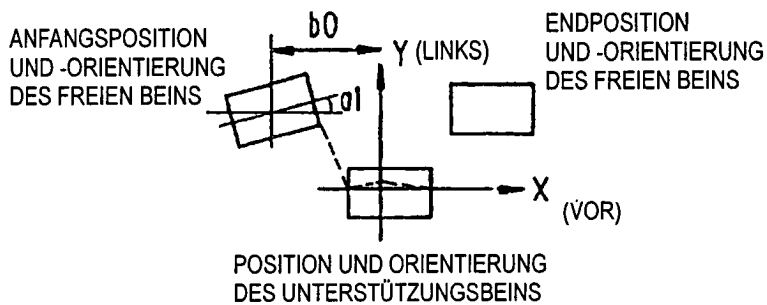


FIG.9

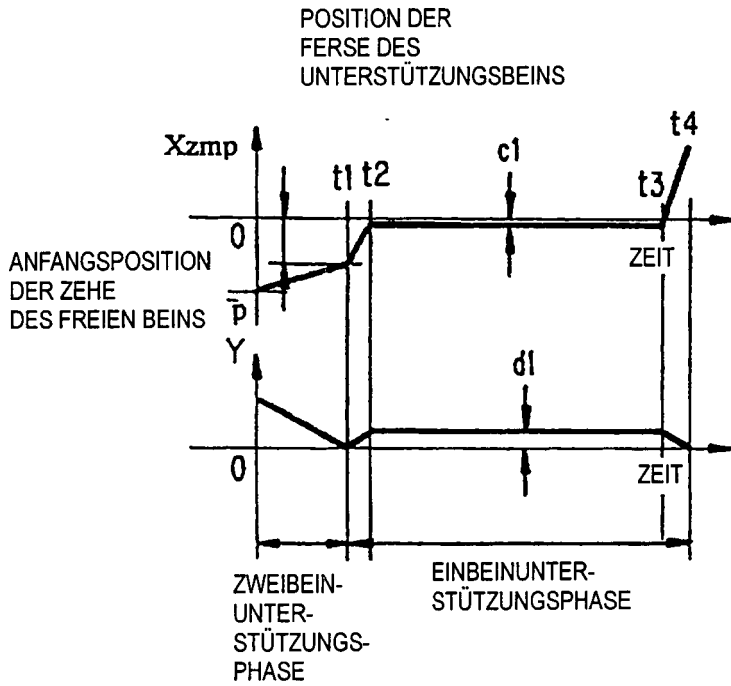


FIG. 10

STANDARTGANGART NR. 2

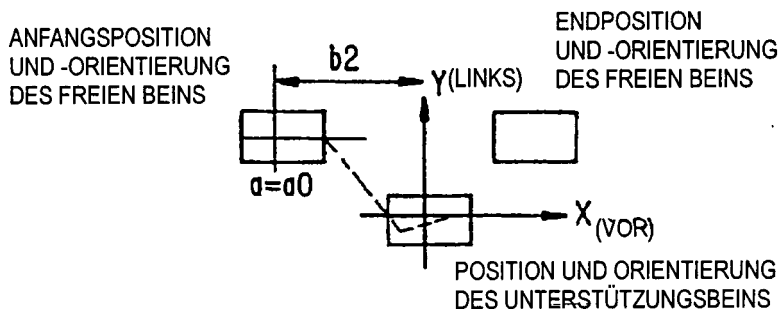


FIG. 11

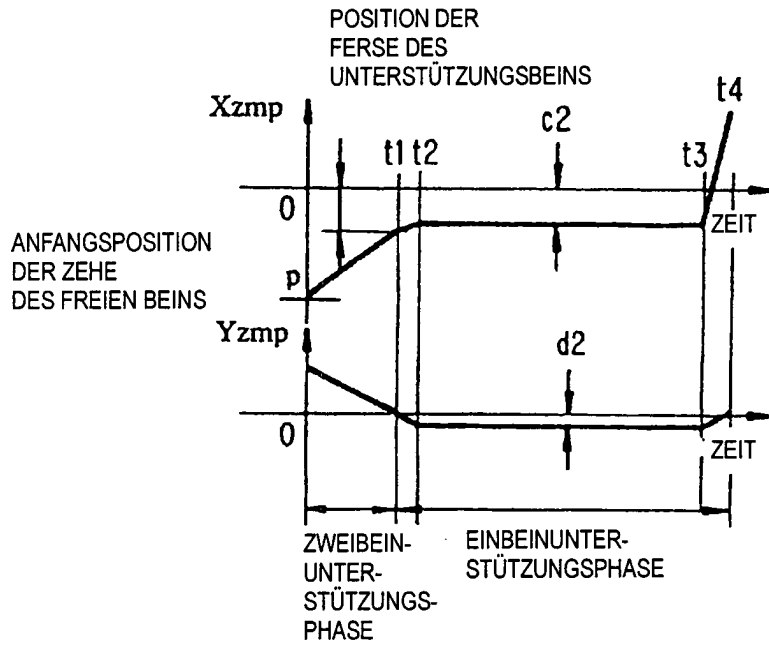


FIG. 12

ANFORDERUNGSGANGART (3. GANGART)

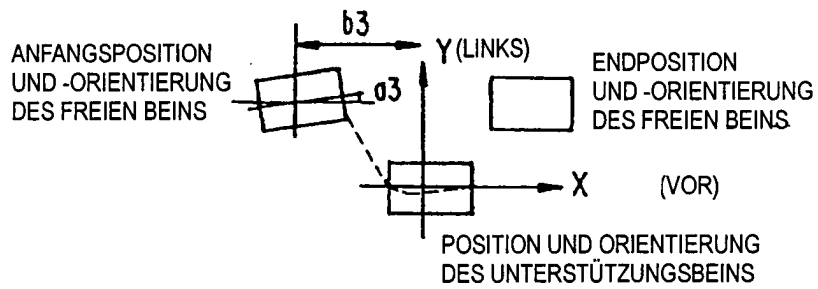


FIG. 13

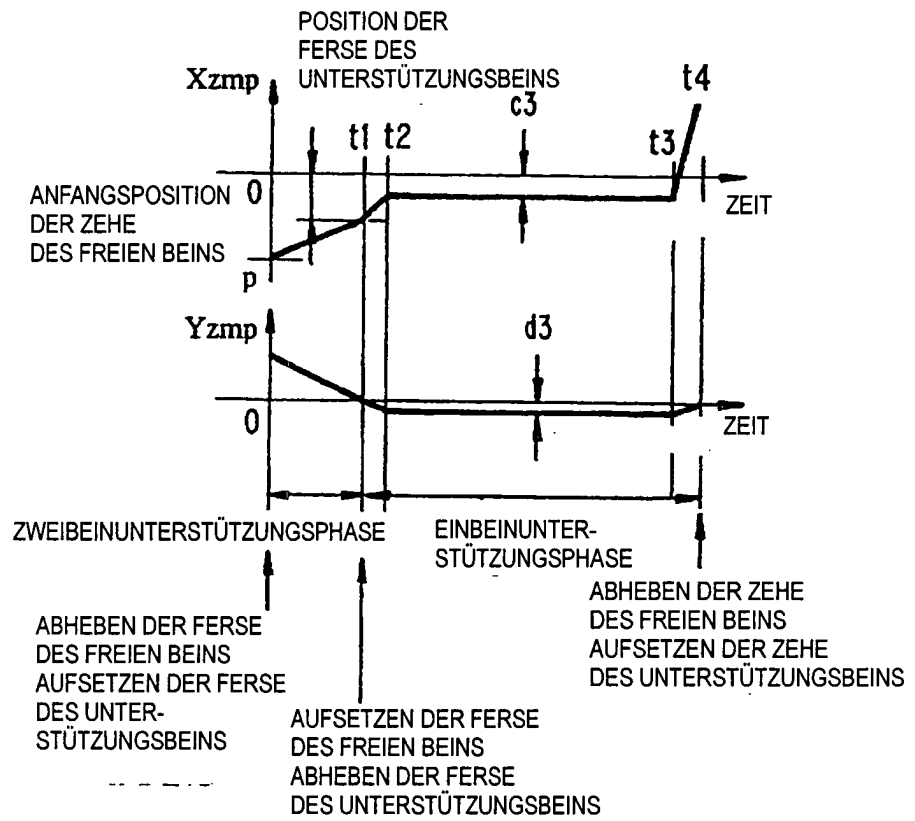


FIG. 14

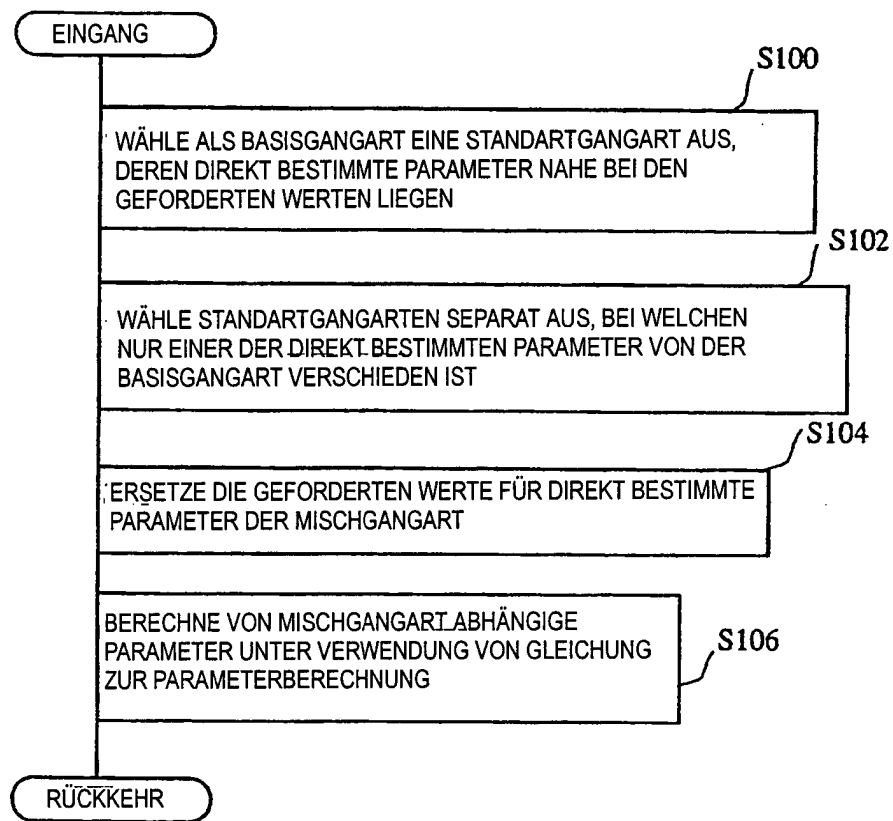


FIG. 15

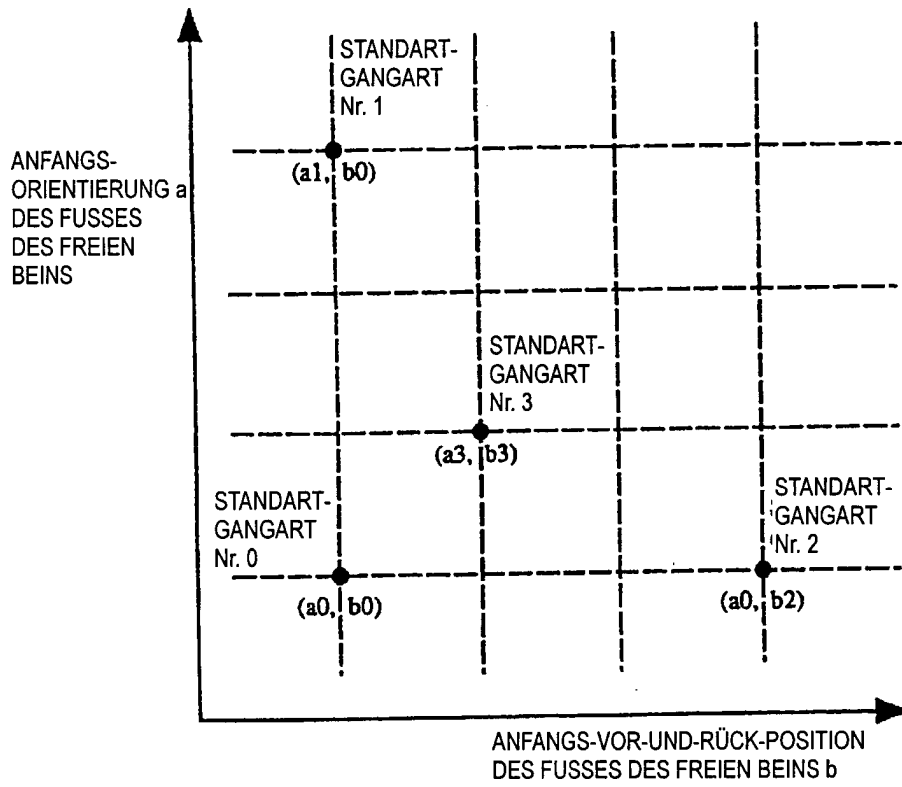


FIG. 16

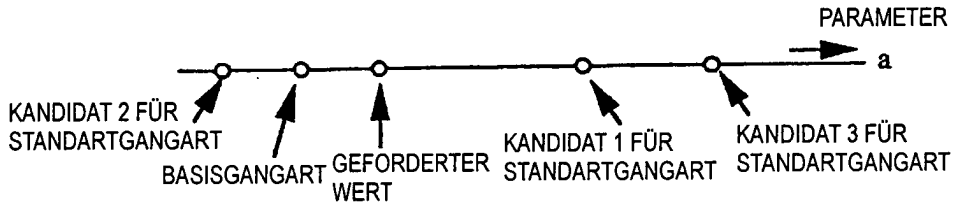


FIG. 17

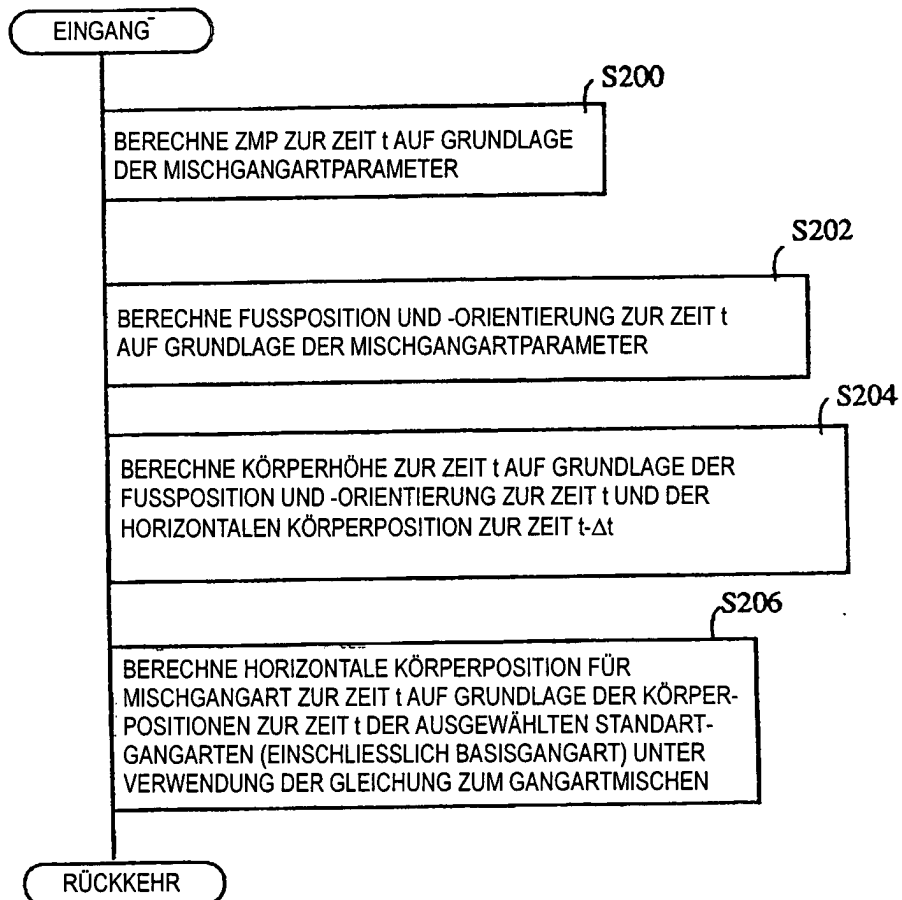


FIG. 18

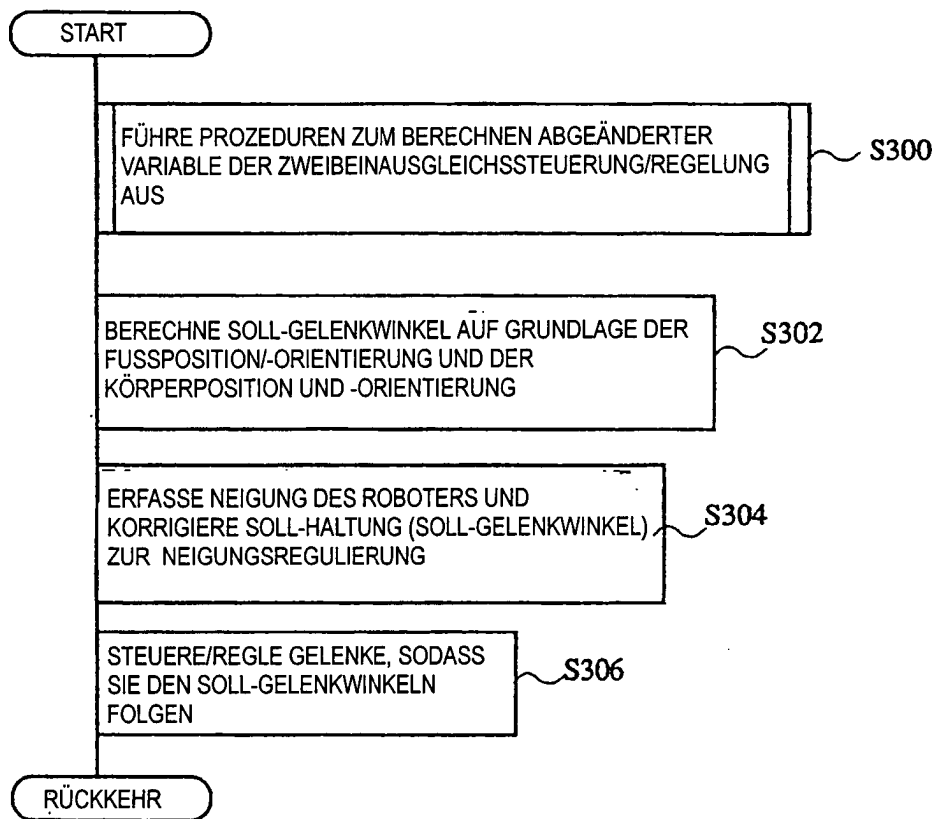


FIG. 19

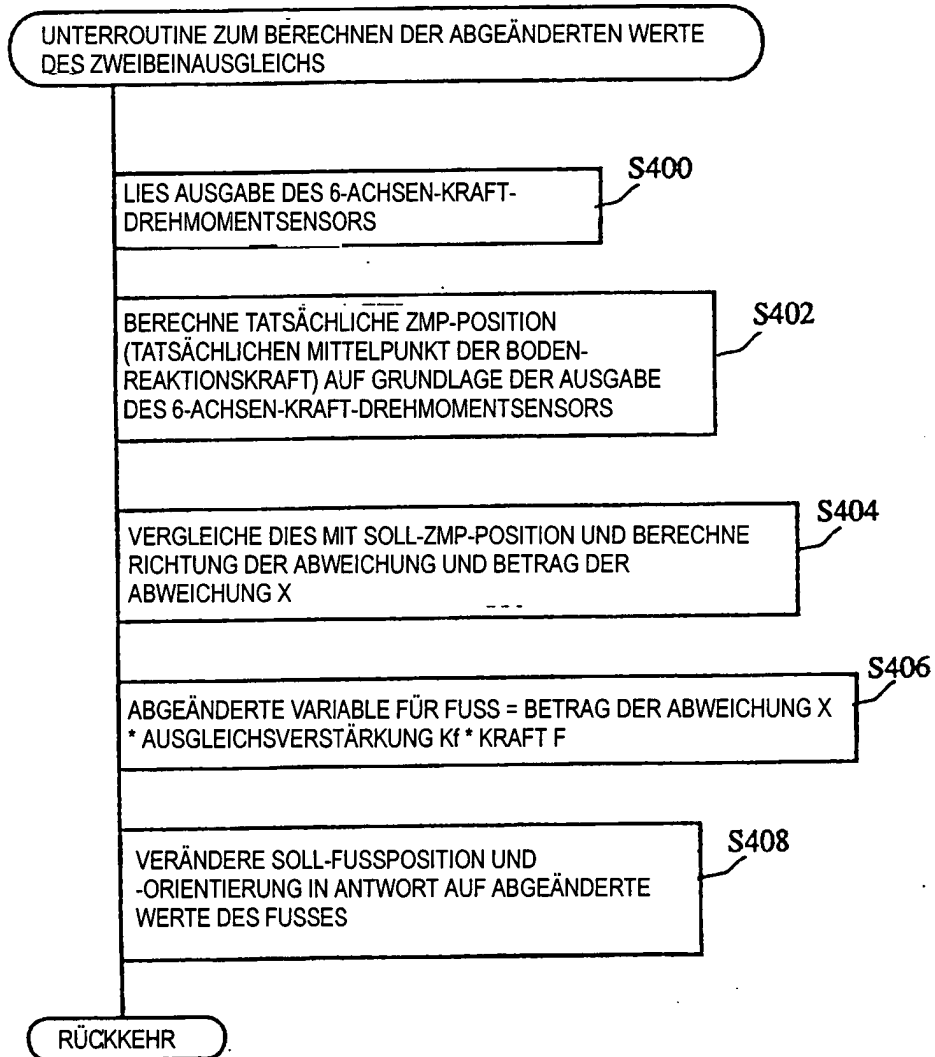


FIG. 20

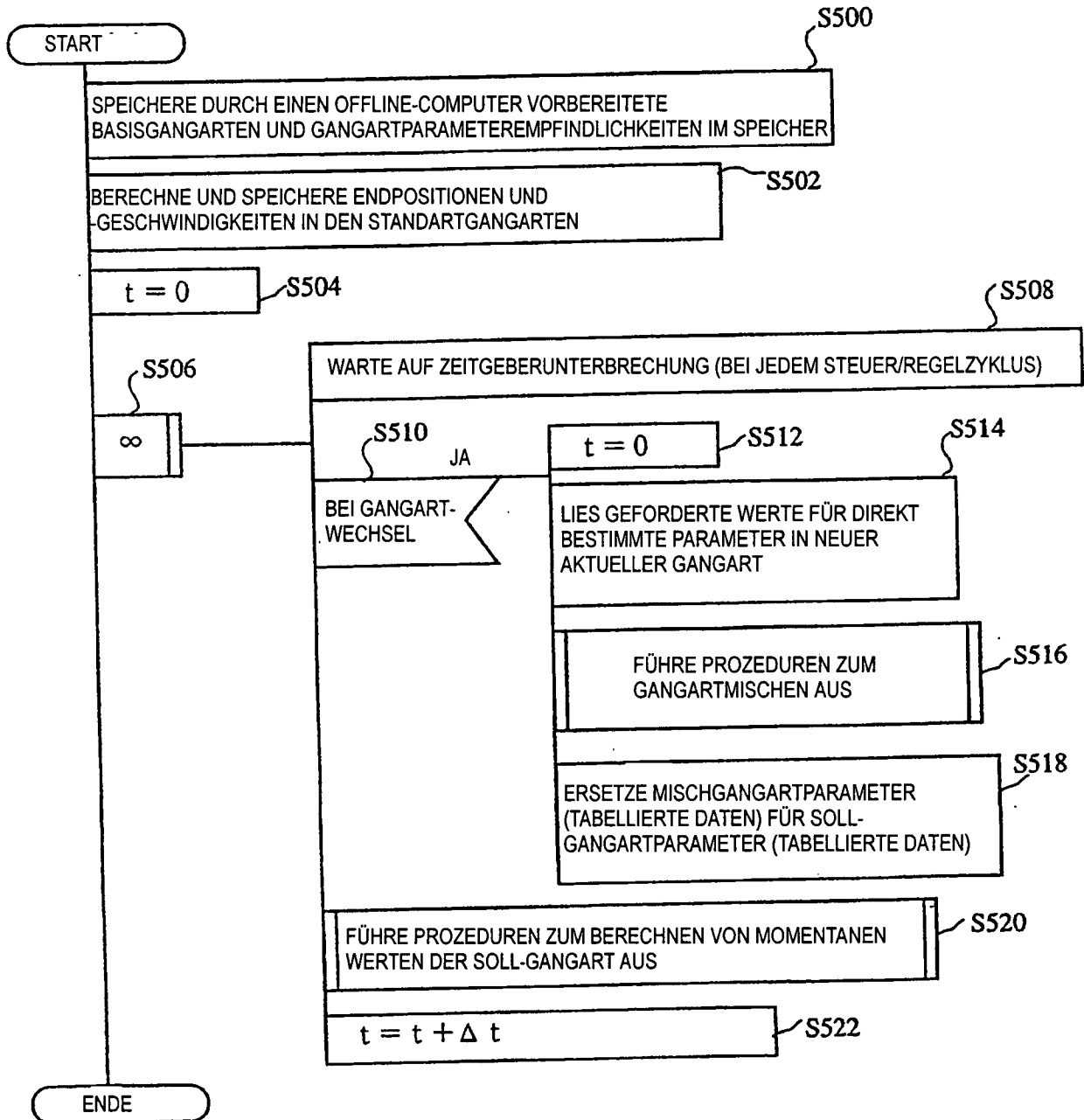


FIG. 21

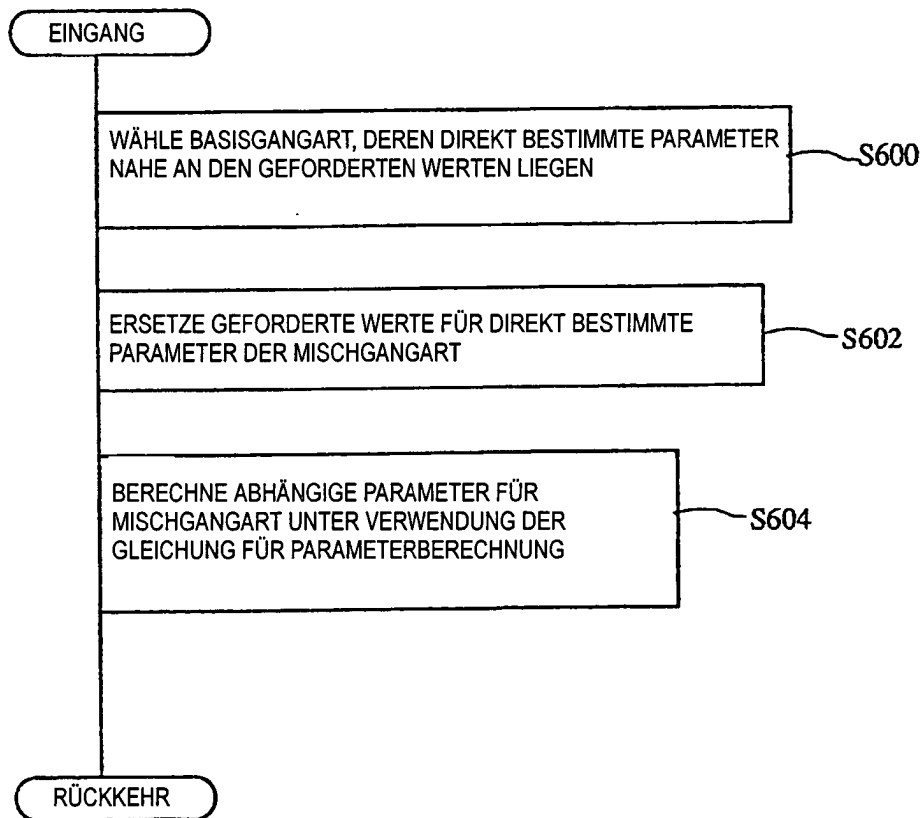


FIG. 22

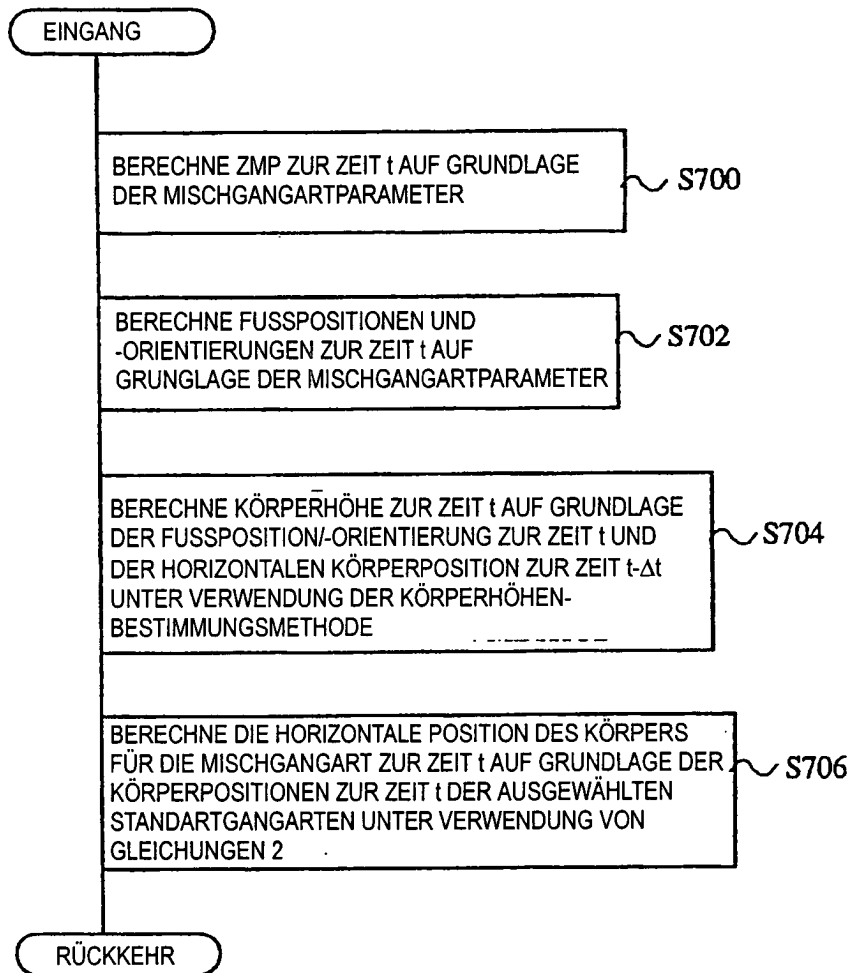


FIG. 23

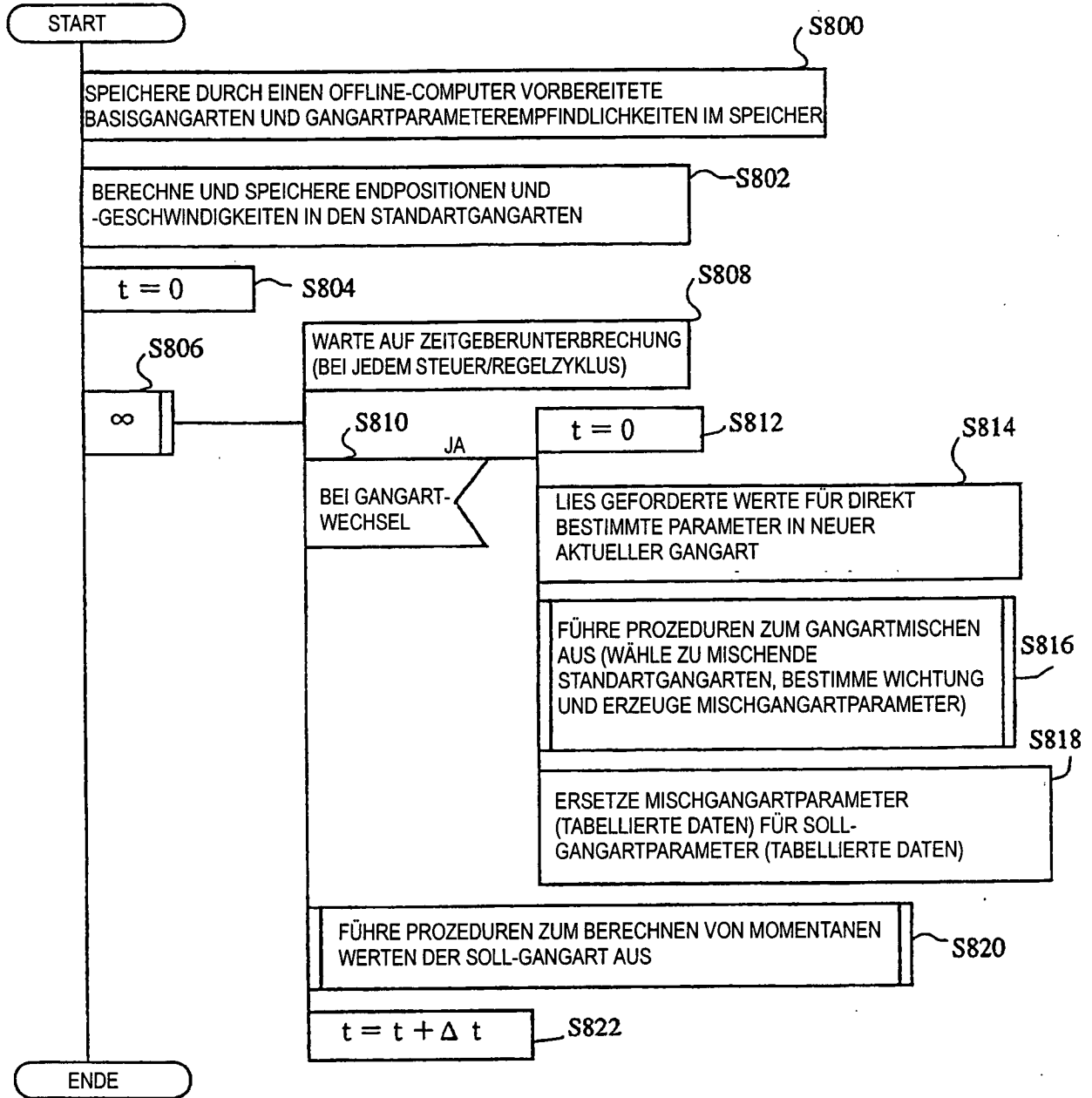


FIG. 24

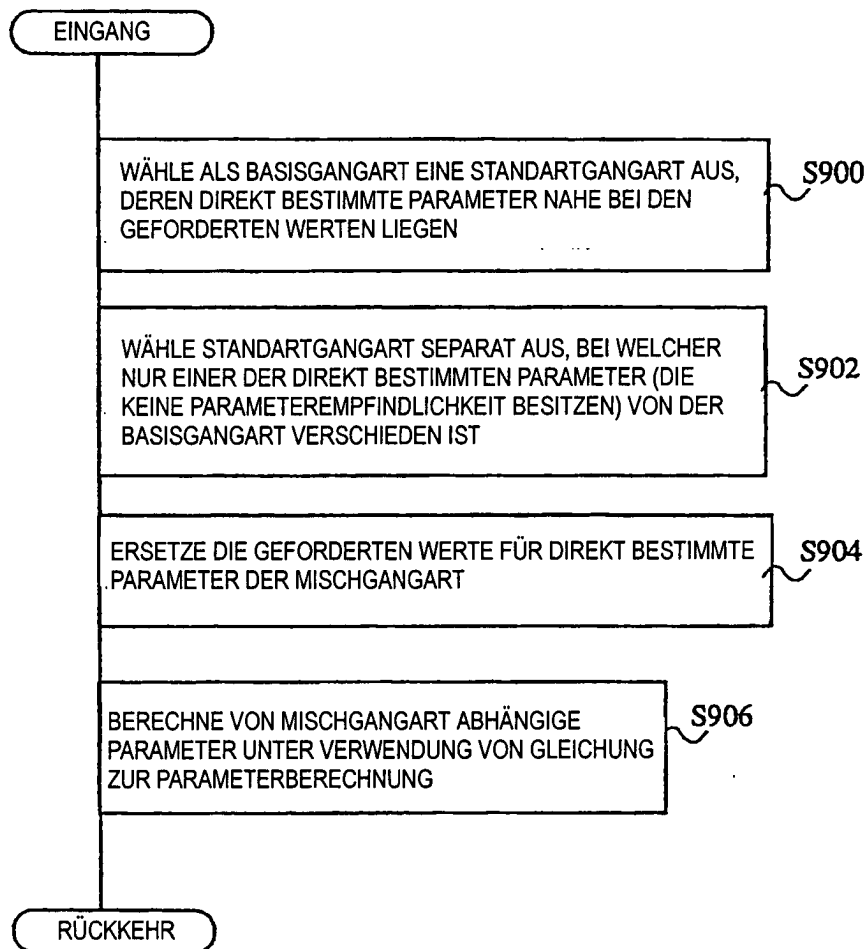


FIG. 25

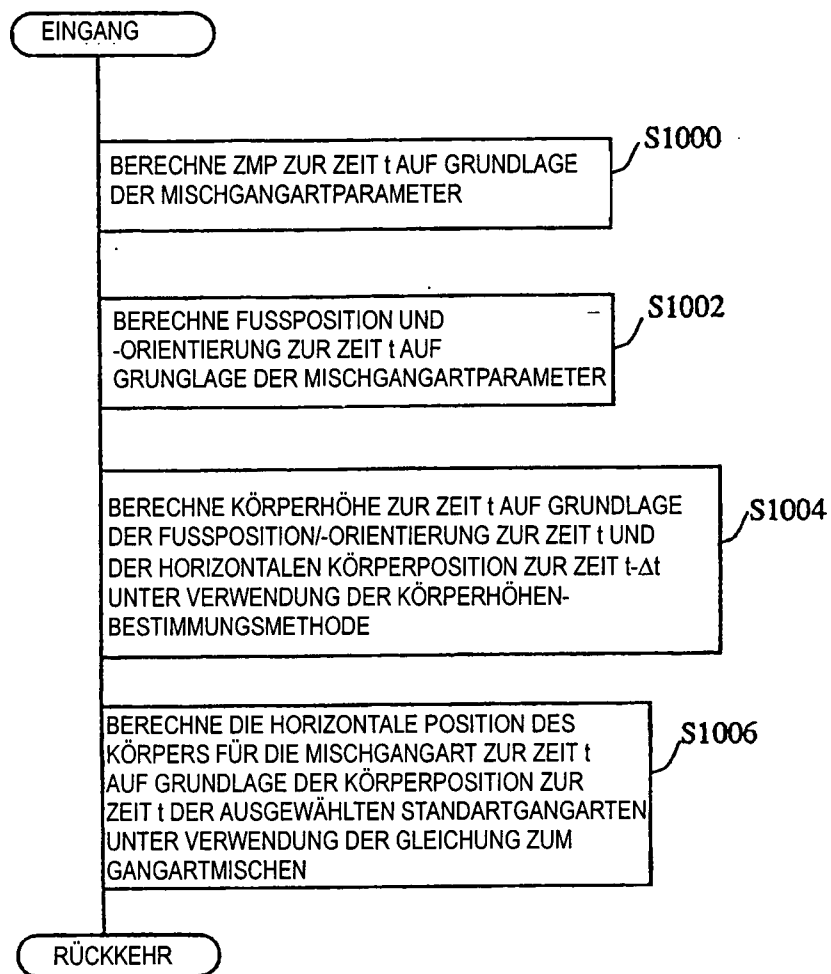


FIG. 26

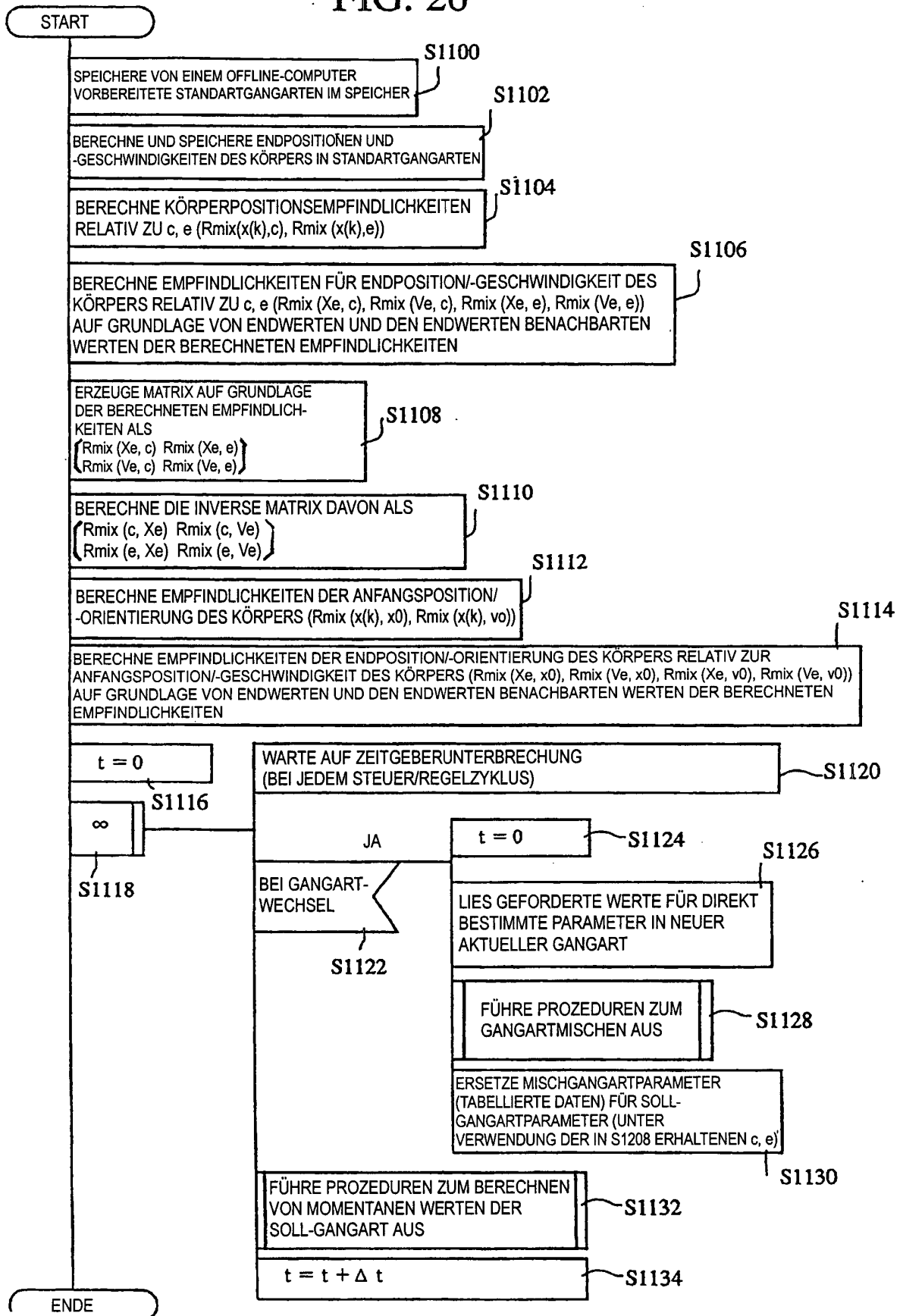


FIG. 27

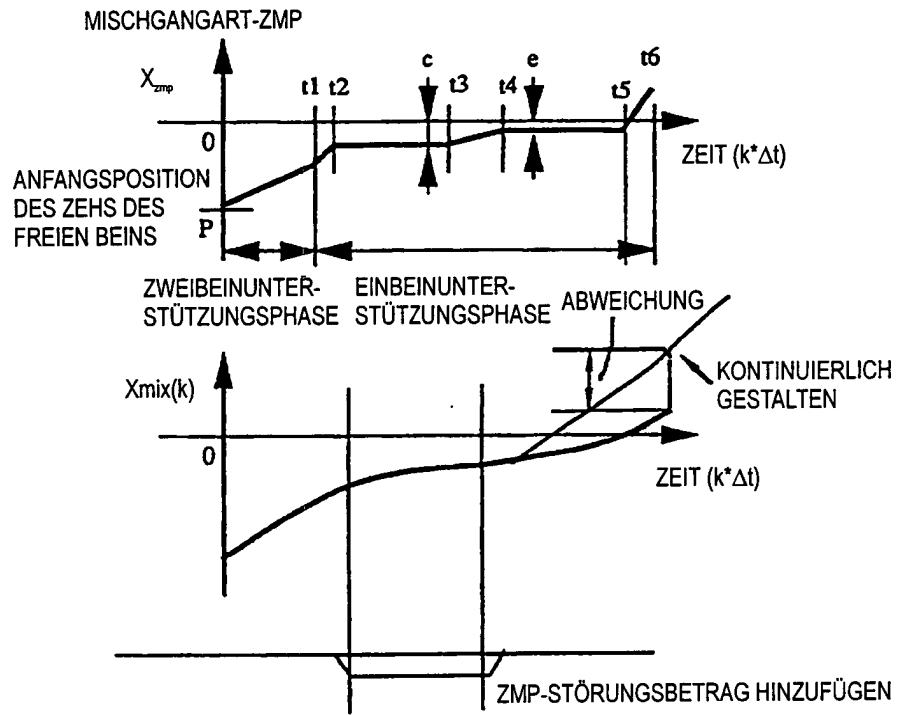


FIG. 28

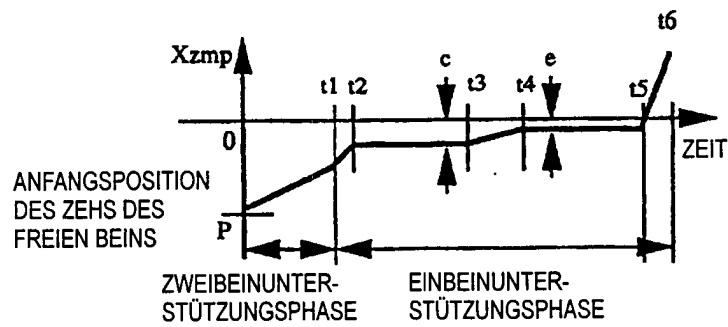


FIG. 29

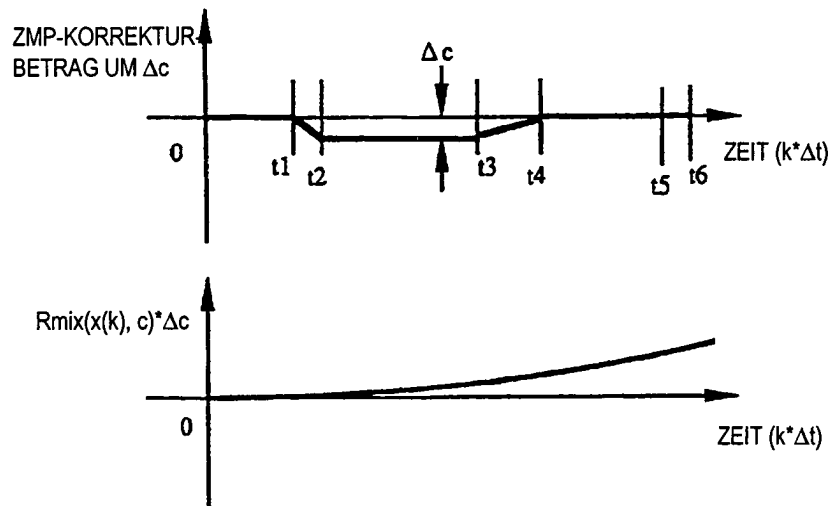


FIG. 30

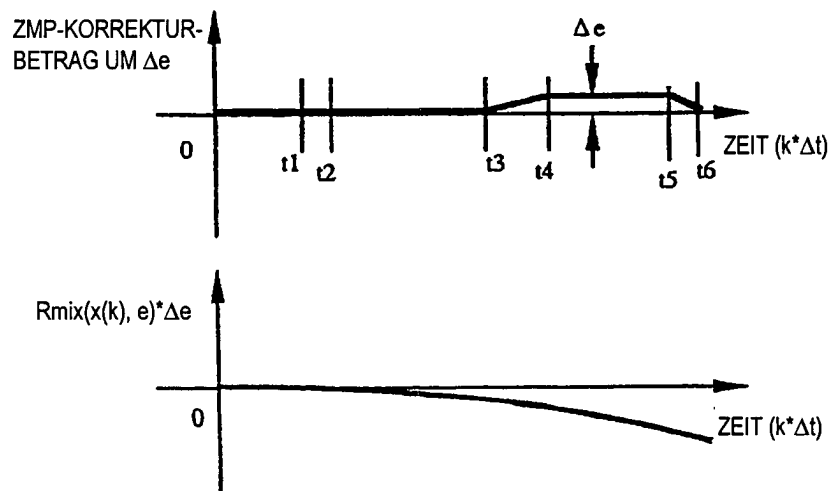


FIG. 31

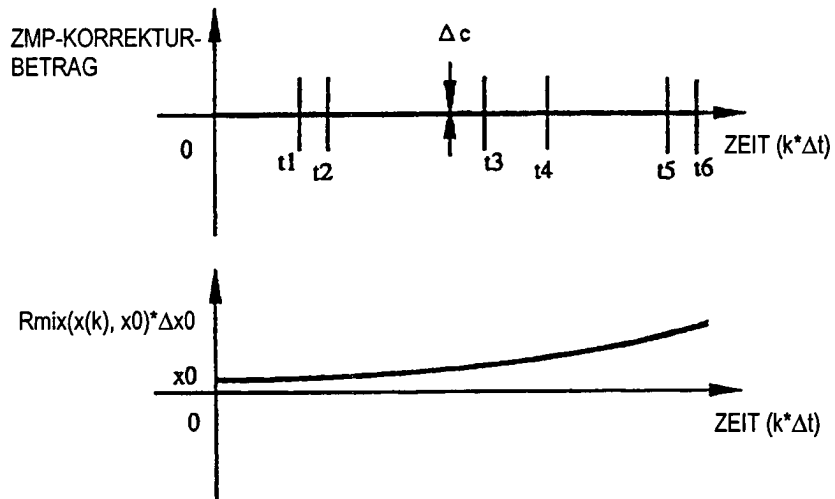


FIG. 32

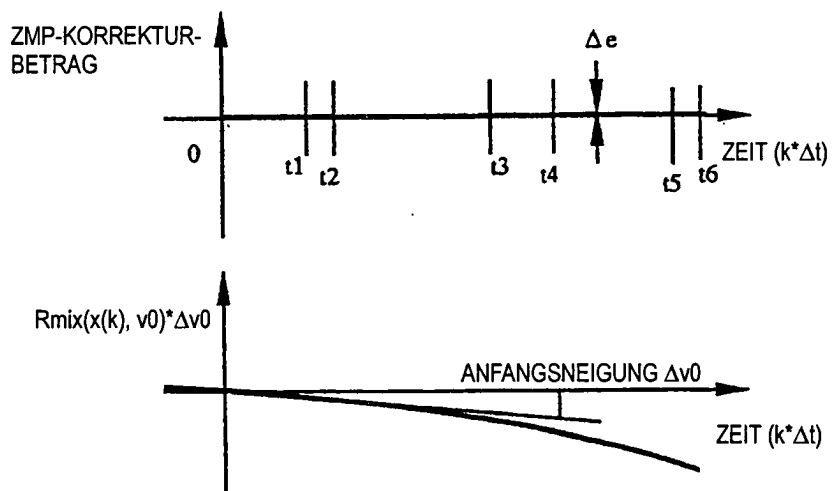


FIG. 33

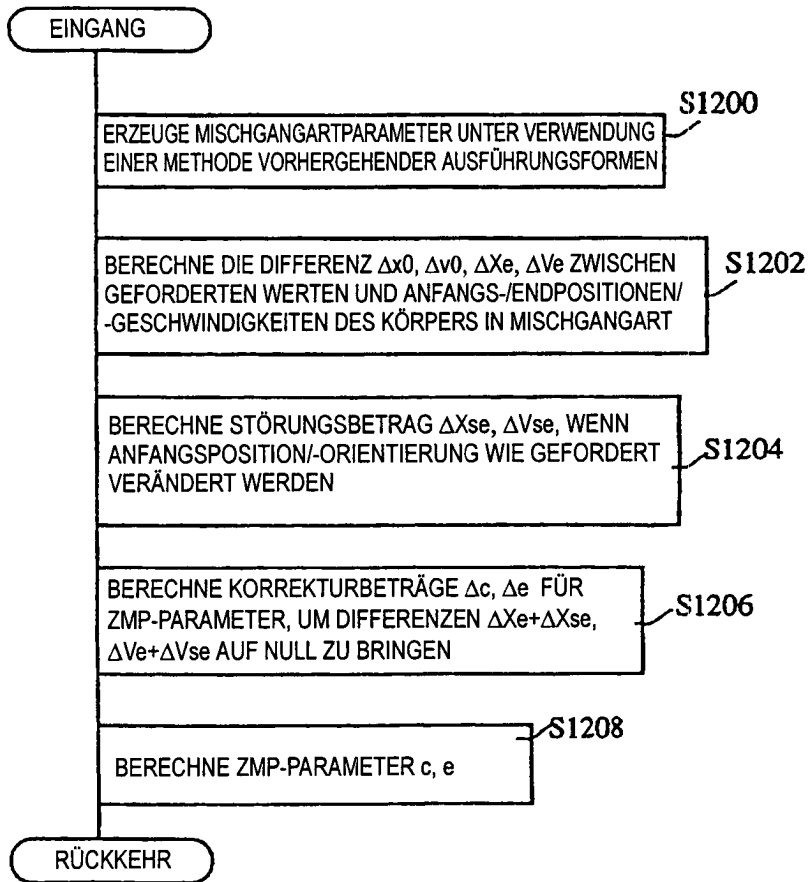


FIG. 34

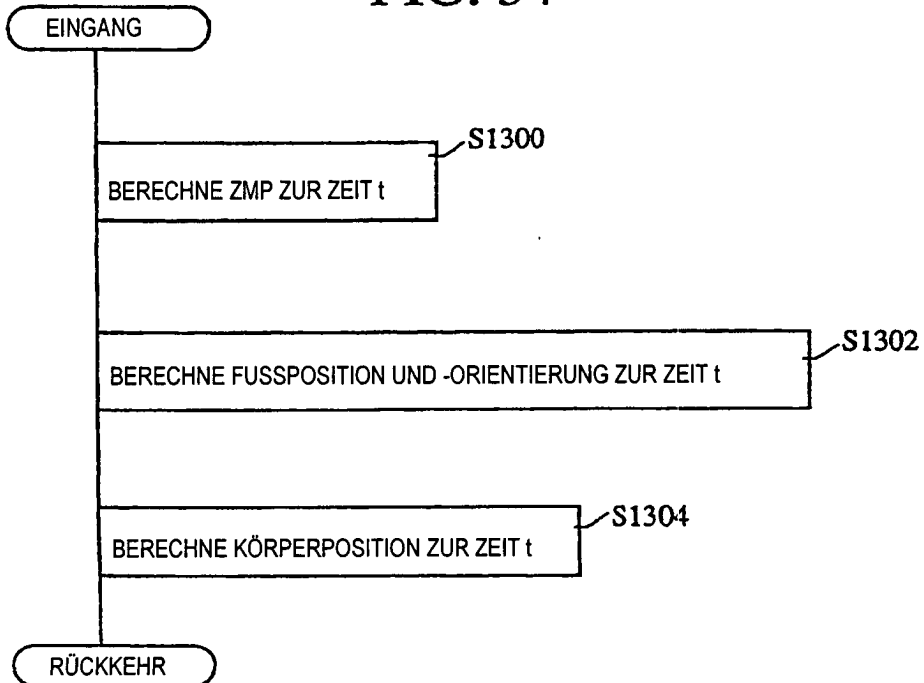


FIG. 35

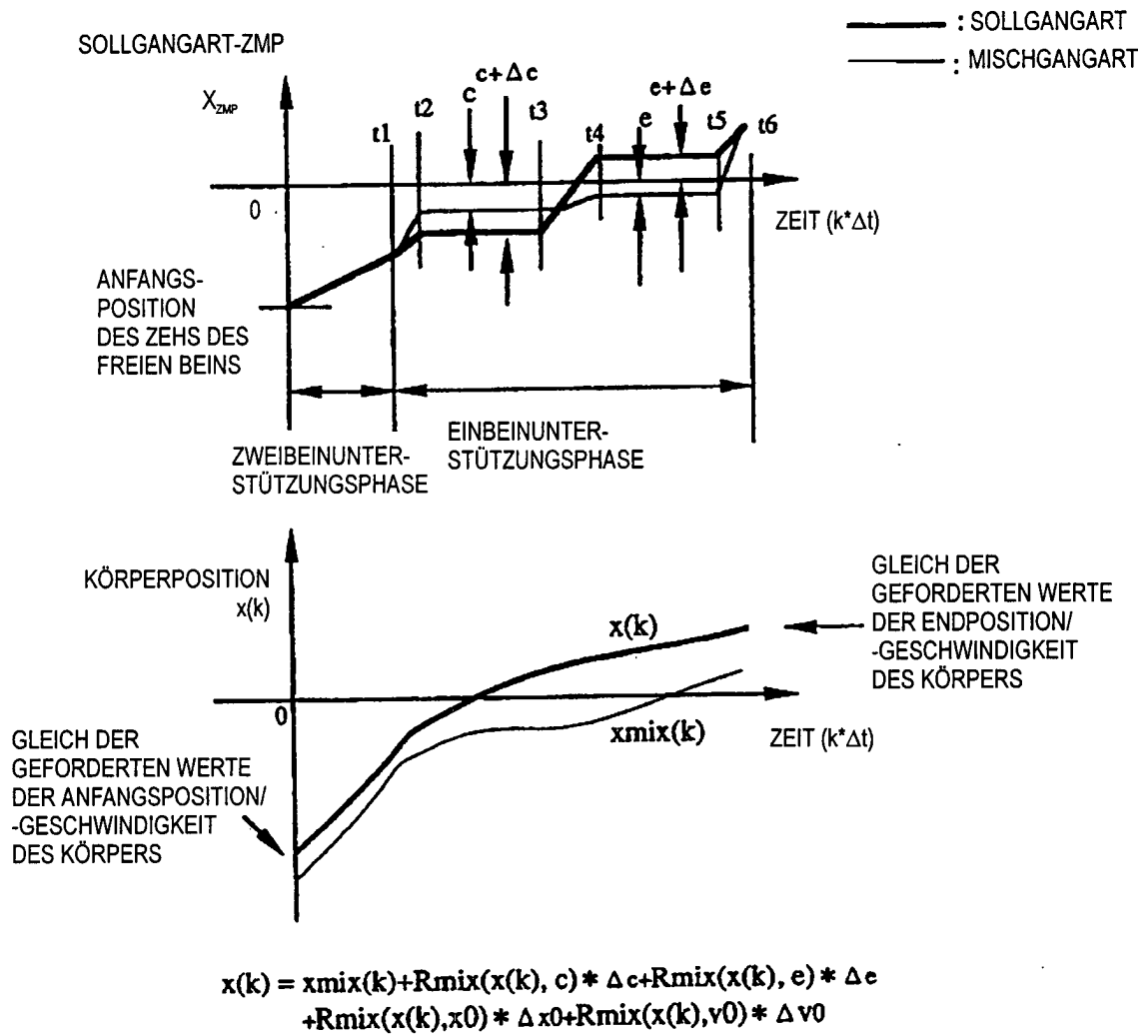


FIG. 36

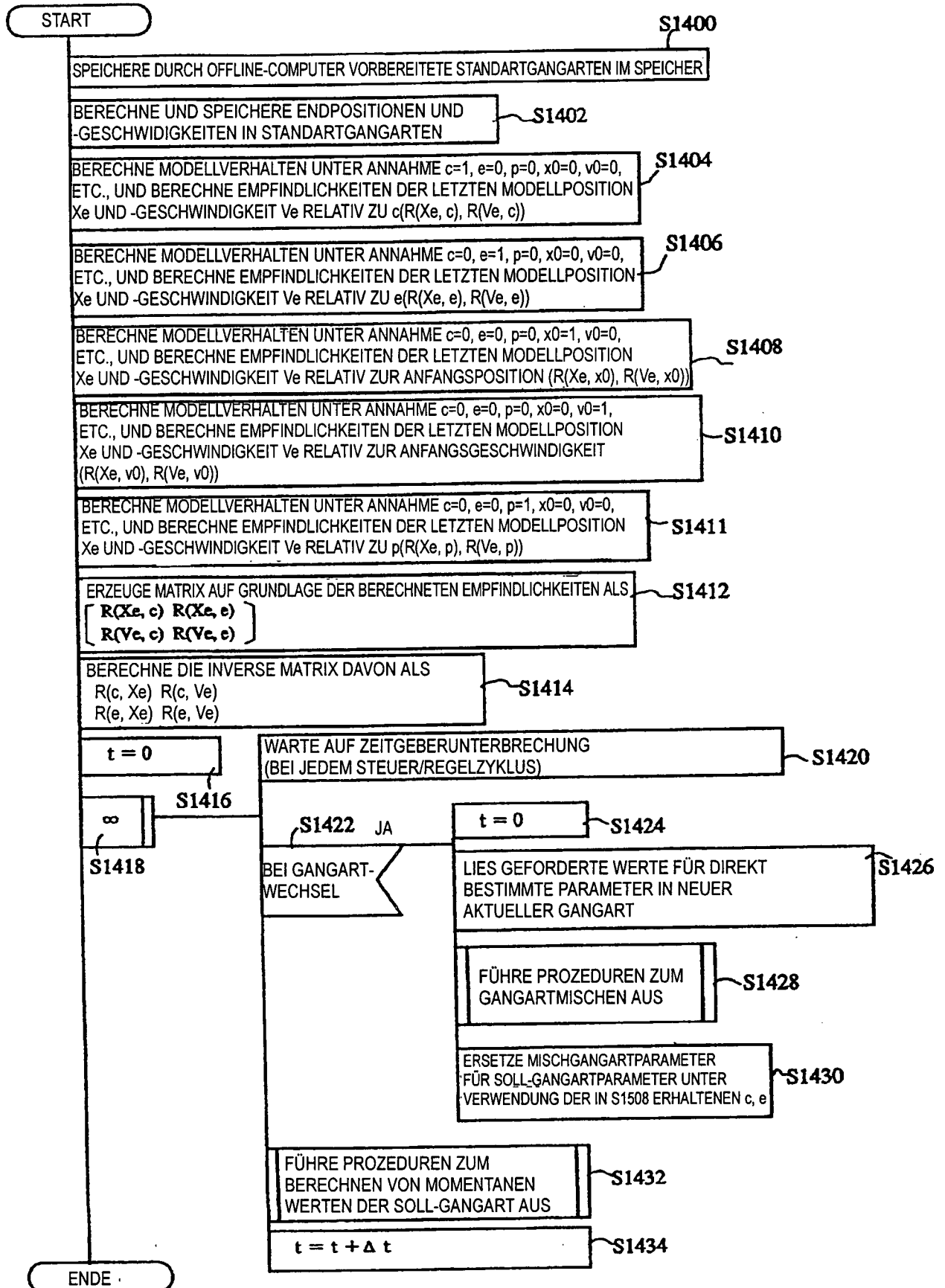


FIG. 37.

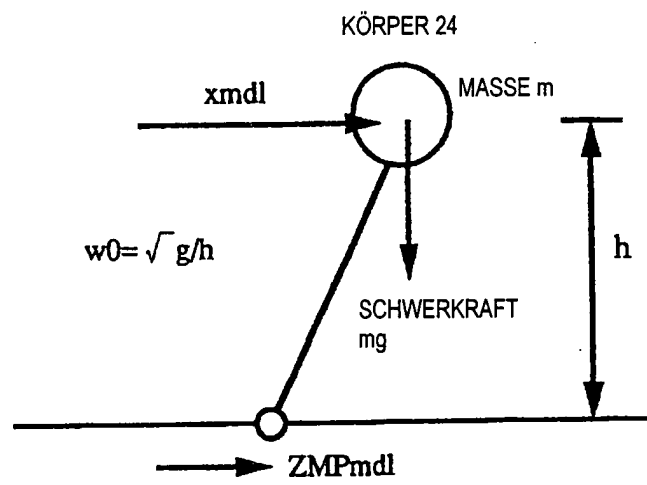


FIG. 38

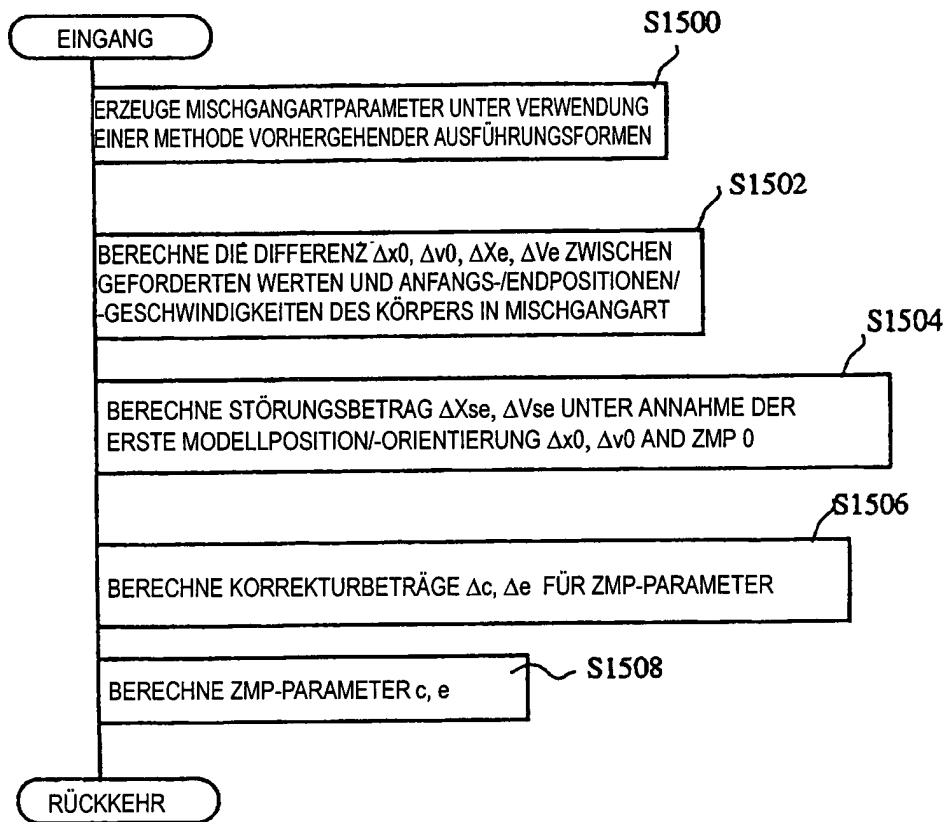


FIG. 39

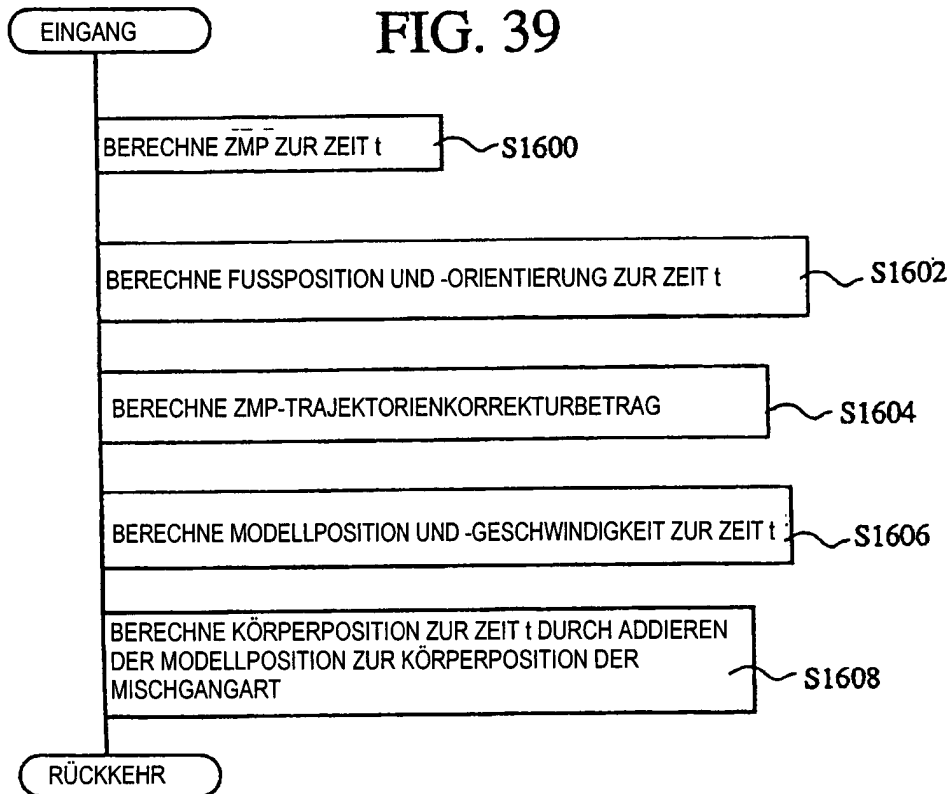


FIG. 40

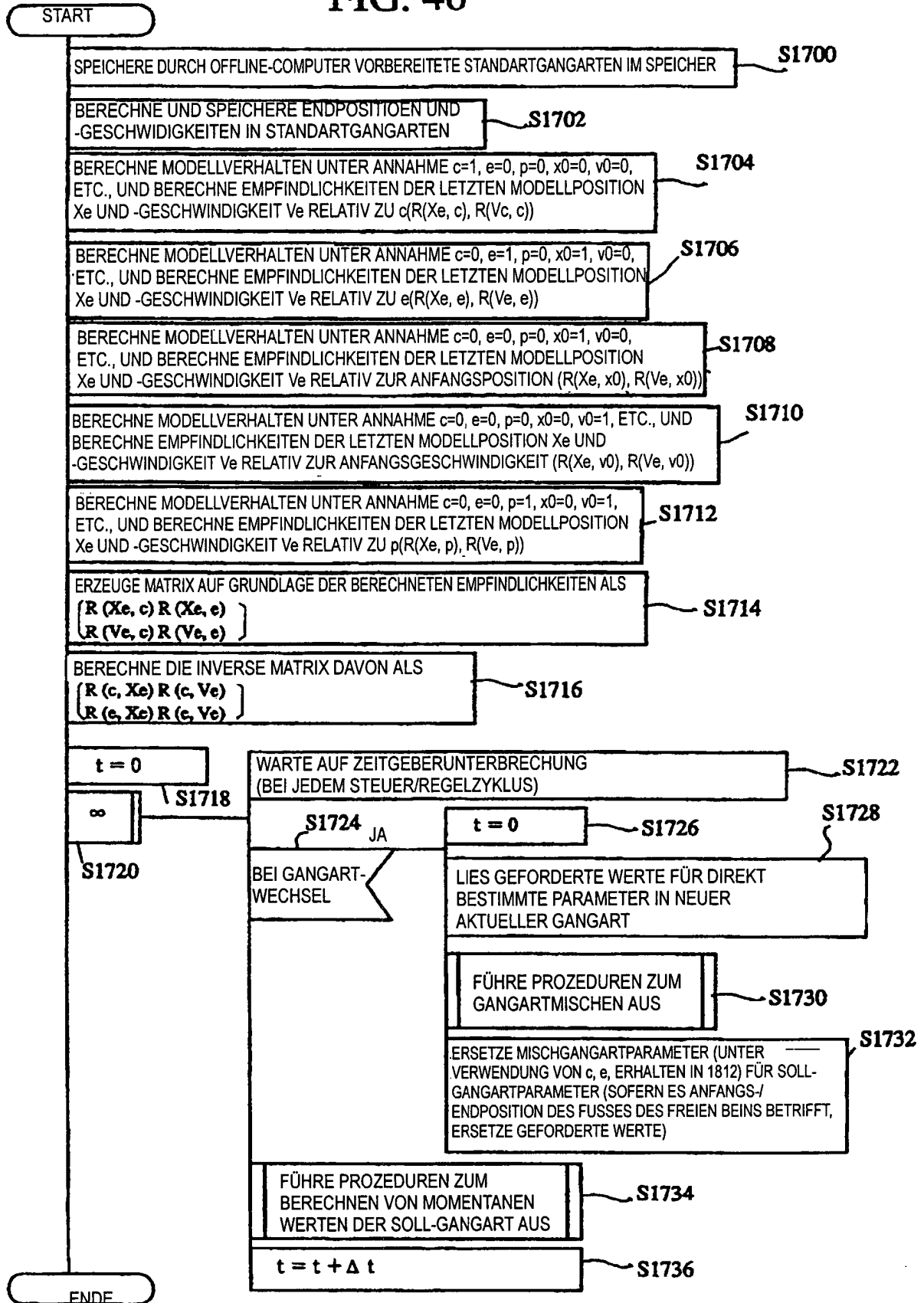


FIG. 41

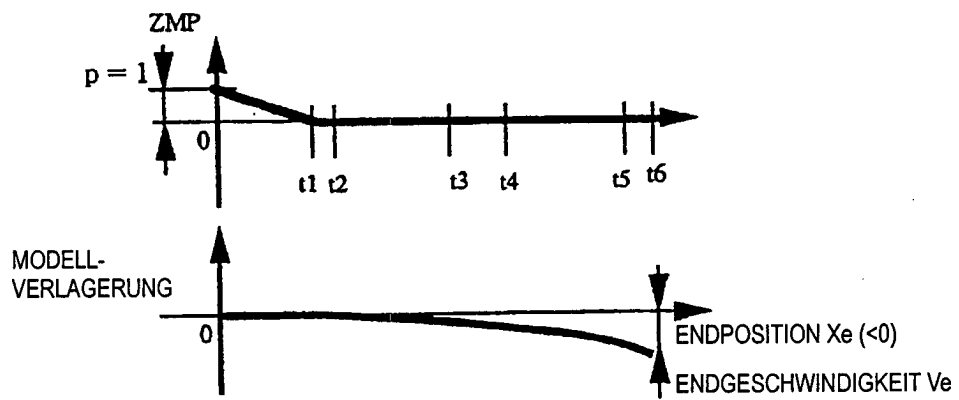


FIG. 42

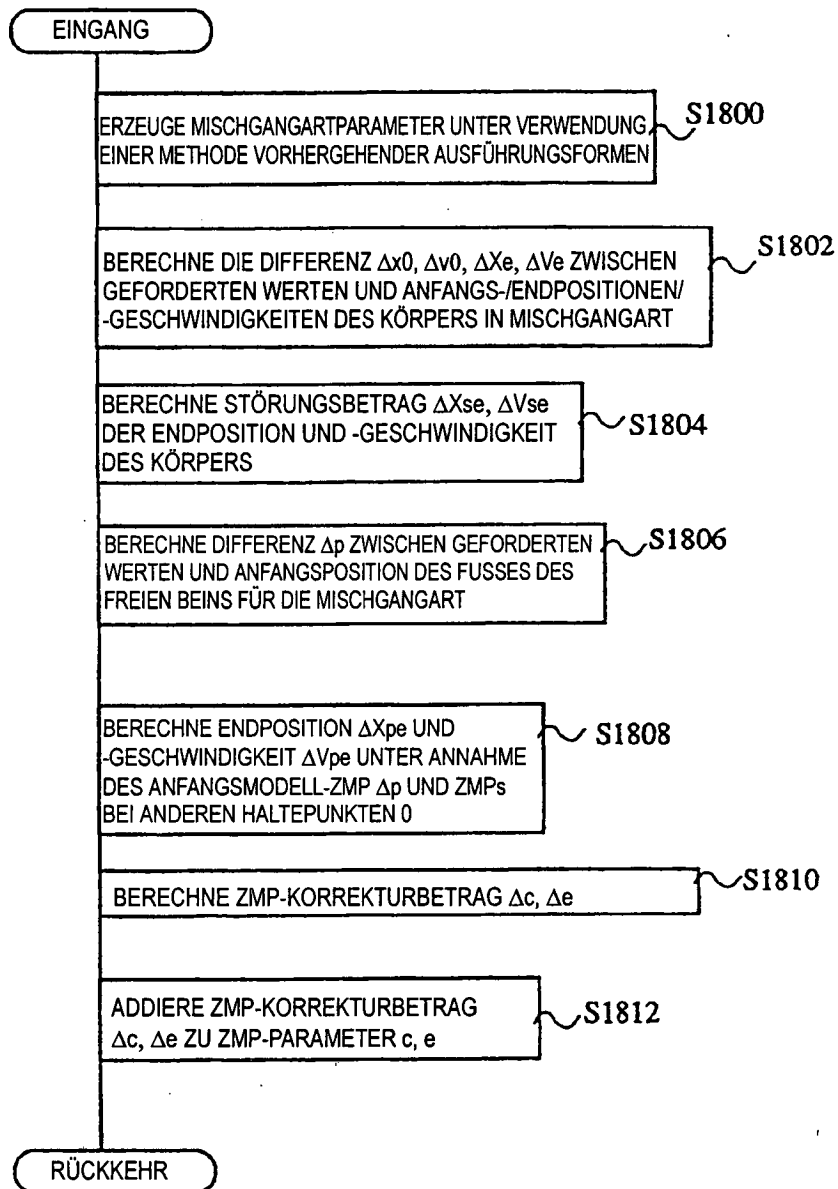


FIG. 43

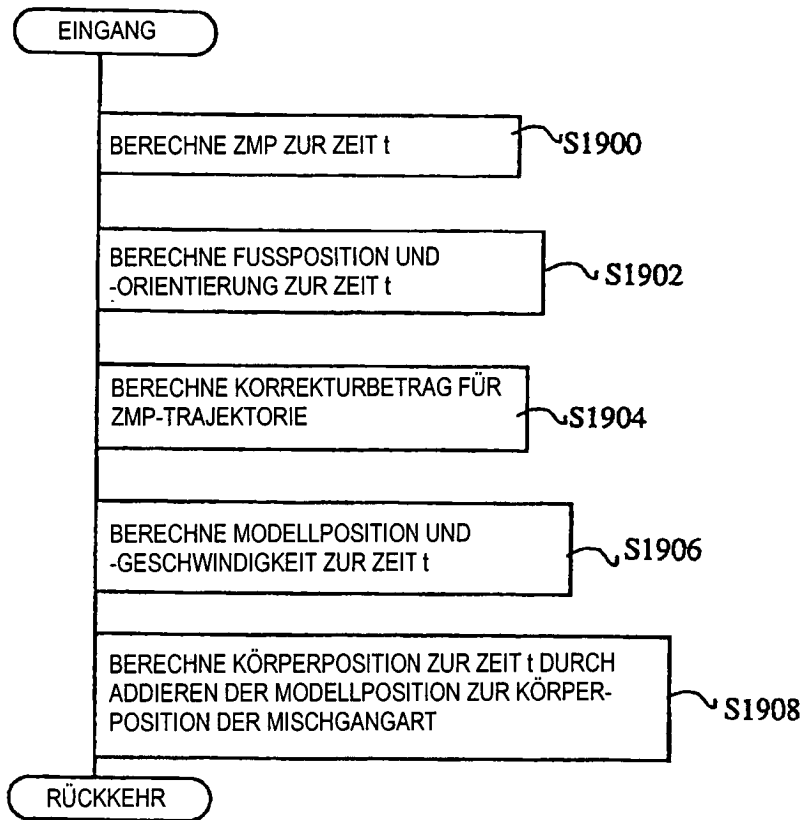


FIG. 44

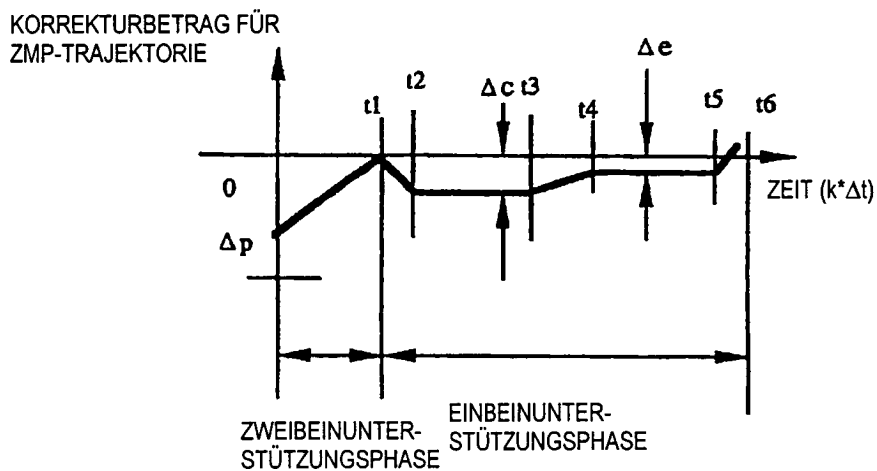


FIG.45

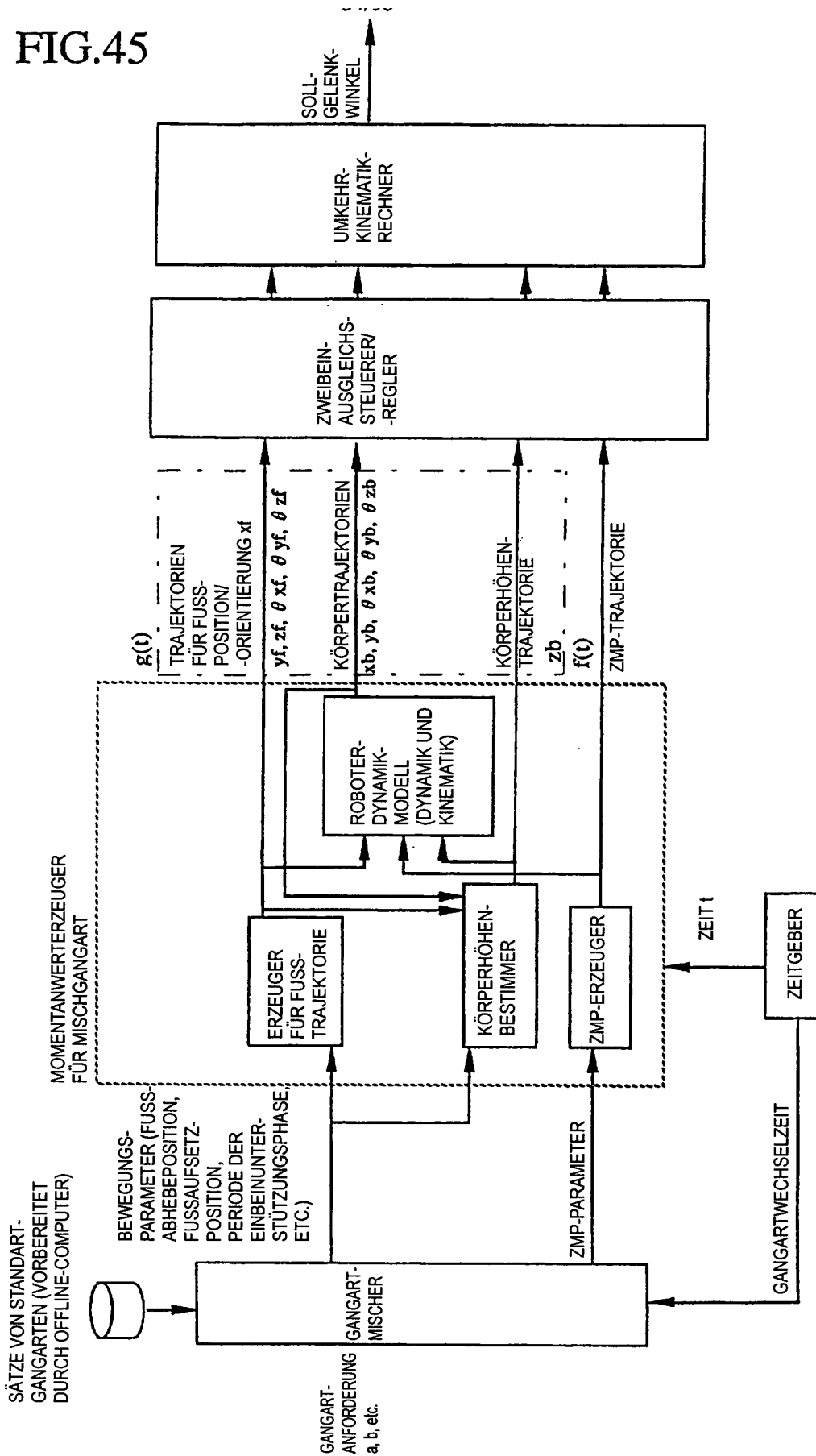


FIG. 46

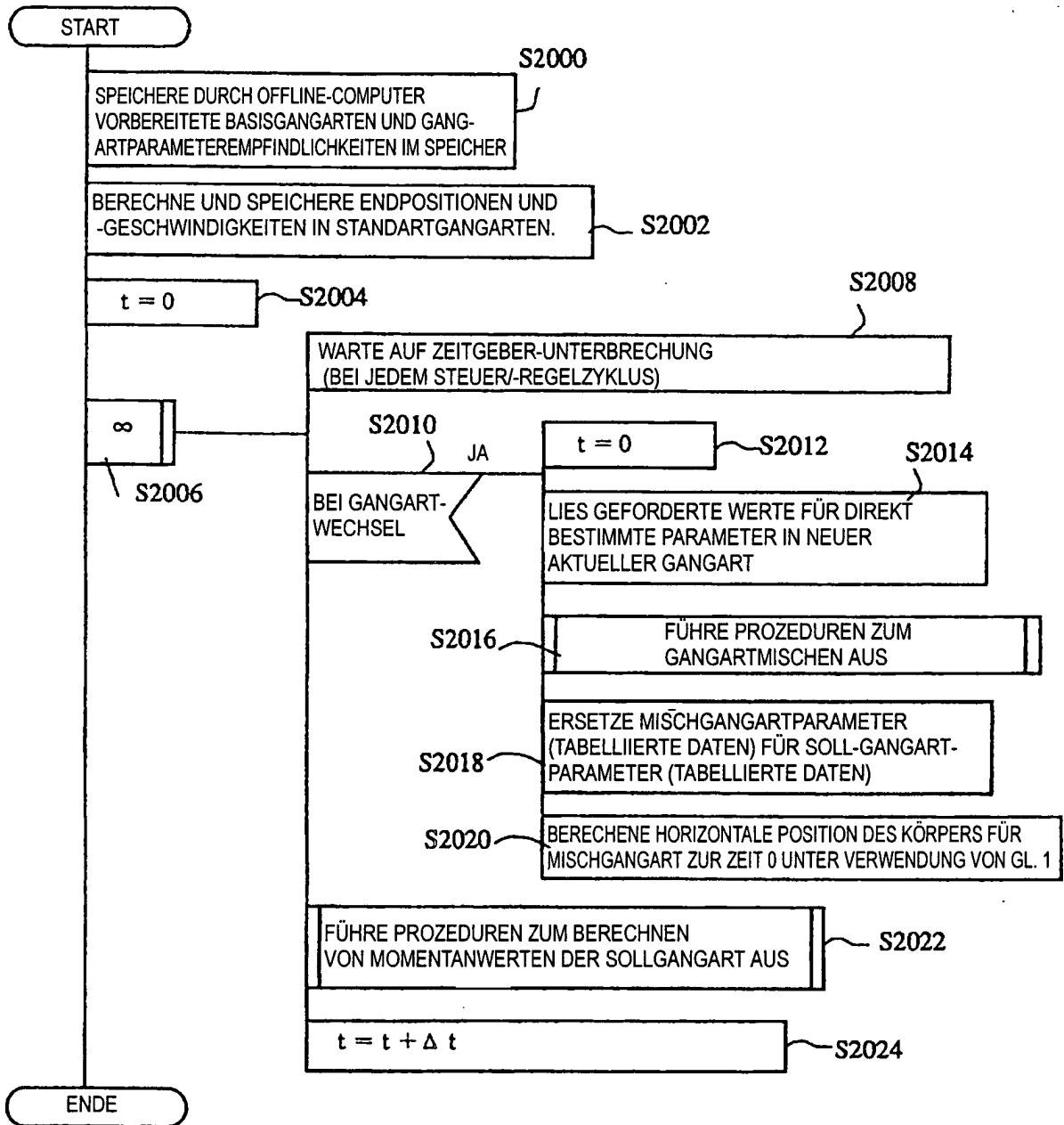


FIG. 47

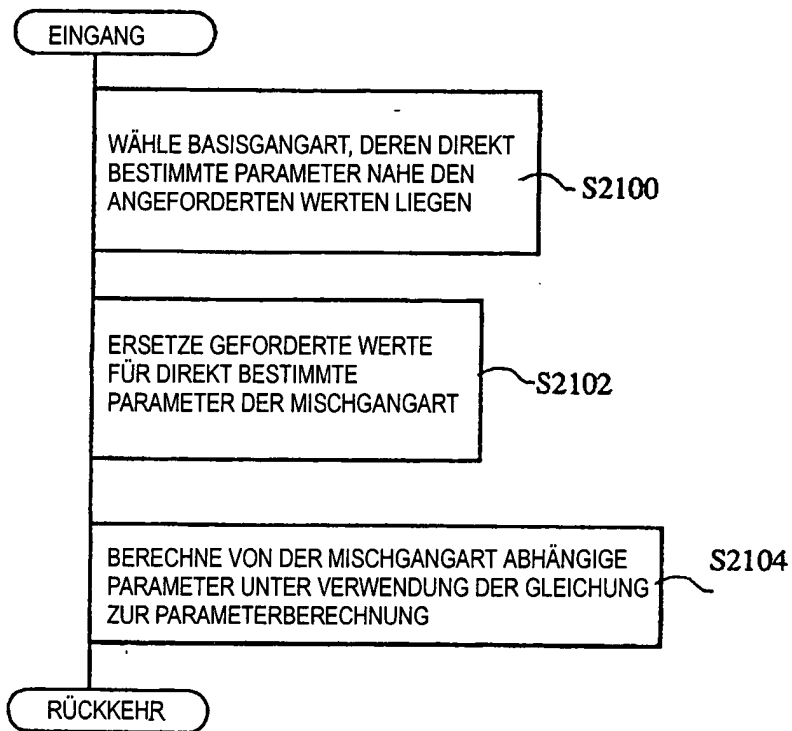


FIG. 48

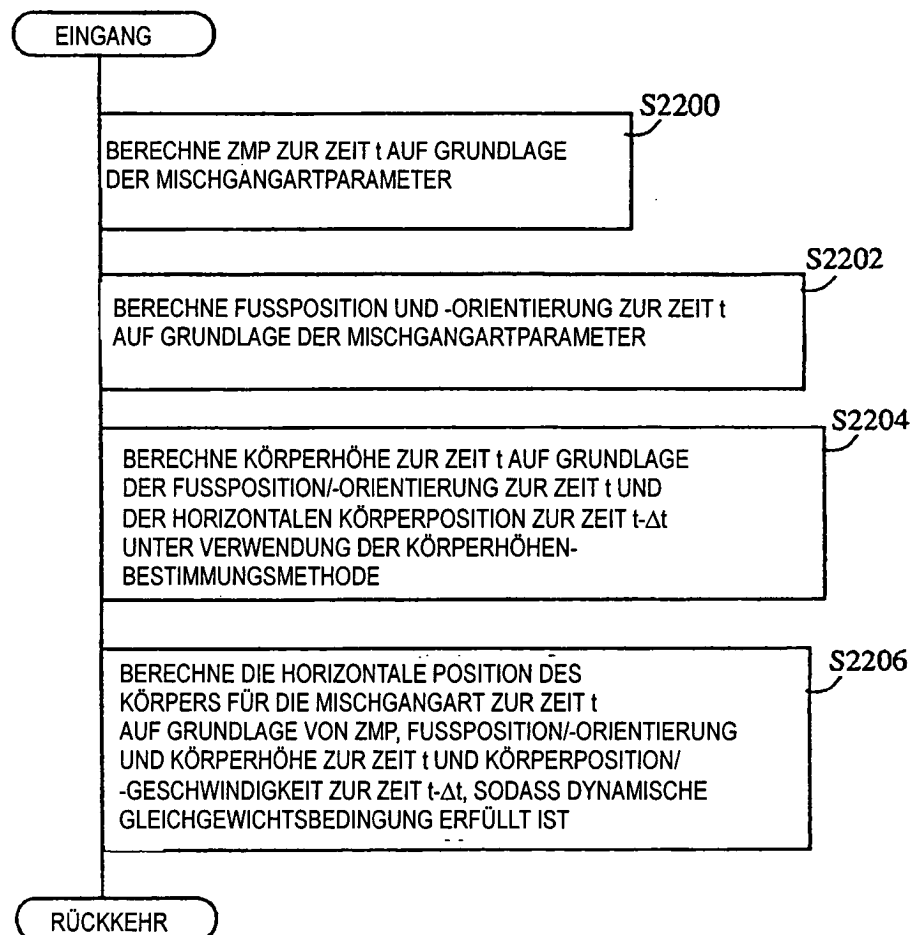


FIG. 49

