

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-142465
(P2006-142465A)

(43) 公開日 平成18年6月8日(2006.6.8)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
B 2 5 J 5/00 (2006.01)	B 2 5 J 5/00	3 C 0 0 7
B 2 5 J 13/00 (2006.01)	B 2 5 J 13/00	Z
B 6 2 D 57/032 (2006.01)	B 6 2 D 57/02	E

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2004-339737 (P2004-339737)	(71) 出願人 503359821 独立行政法人理化学研究所 埼玉県和光市広沢2番1号
(22) 出願日 平成16年11月25日(2004.11.25)	(74) 代理人 100097515 弁理士 堀田 実
特許法第30条第1項適用申請有り 平成16年6月18日から20日 社団法人日本機械学会主催の「ロボティクス・メカトロニクス講演会 '04」において文書をもって発表	(72) 発明者 浅野 文彦 愛知県名古屋守山区大字下志段味字穴ヶ洞2271-130 サイエンスパーク研究開発センター内 独立行政法人理化学研究所 バイオ・ミメティックコントロール研究センター内
特許法第30条第1項適用申請有り 平成16年9月15日から17日 社団法人日本ロボット学会主催の「第22回 日本ロボット学会学術講演会」において文書をもって発表	

最終頁に続く

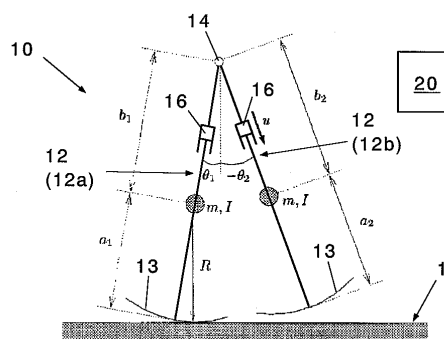
(54) 【発明の名称】 二足歩行ロボットとその歩行制御方法

(57) 【要約】

【課題】 シンプルな機構で平地歩行ができ、障害物回避や不整地歩行へも適応でき、ZMPの問題を本質的に回避して、従来と比較して大幅な歩行速度の向上が実現できる二足歩行ロボットとその歩行制御方法を提供する。

【解決手段】 歩行面1と接触して滑らない足部13を下端に有する1対の細長い脚12と、1対の脚を歩行方向に交互に揺動可能に連結する腰部14と、各脚の重心より上部を伸縮させる伸縮アクチュエータ16と、伸縮アクチュエータを制御する制御装置20とを備え、脚の一方を支持脚12a、他方を遊脚12bとして、交互に片脚で支持しながら歩行する二足歩行ロボット。制御装置20により、支持脚12aを伸びた状態で保持し、遊脚12bを支持脚よりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させる。

【選択図】 図1



Model of a planar biped robot with telescopic leg

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

歩行面と接触して滑らない足部を下端に有する 1 対の細長い脚と、該 1 対の脚を歩行方向に交互に揺動可能に連結する腰部と、各脚の重心より上部を伸縮させる伸縮アクチュエータと、該伸縮アクチュエータを制御する制御装置とを備え、脚の一方を支持脚、他方を遊脚として、交互に片脚で支持しながら歩行する二足歩行ロボットであって、

前記制御装置により、支持脚を伸びた状態で保持し、遊脚を支持脚よりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させる、ことを特徴とする二足歩行ロボット。

【請求項 2】

前記各脚の重心より上部に、前記伸縮アクチュエータと並列に伸縮に抗する弾性体を備える、ことを特徴とする請求項 1 に記載の二足歩行ロボット。

【請求項 3】

前記 1 対の脚を歩行方向に交互に揺動駆動する股関節アクチュエータを備える、ことを特徴とする請求項 1 に記載の二足歩行ロボット。

【請求項 4】

前記足部は、歩行方向に凸曲面状の足裏を有する、ことを特徴とする請求項 1 に記載の二足歩行ロボット。

【請求項 5】

歩行面と接触して滑らない足部を下端に有する 1 対の細長い脚と、該 1 対の脚を歩行方向に交互に揺動可能に連結する腰部と、各脚の重心より上部を伸縮させる伸縮アクチュエータと、該伸縮アクチュエータを制御する制御装置とを備え、脚の一方を支持脚、他方を遊脚として、交互に片脚で支持しながら歩行する二足歩行ロボットの歩行制御方法であって、

支持脚を伸びた状態で保持し、遊脚を支持脚よりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させる、ことを特徴とする二足歩行ロボットの歩行制御方法。

【請求項 6】

支持脚交換の衝突から次の衝突までに要する歩行周期 T に対し、その衝突の瞬間から遊脚伸縮部が再び伸び切るまでの目標整定時間 $T_{s.e.t}$ を歩行周期 T よりも短く設定し、歩行周期 T の初めから目標整定時間 $T_{s.e.t}$ まで遊脚を支持脚よりも短く伸縮させ、目標整定時間 $T_{s.e.t}$ 以降は支持脚と同一の伸びた状態で保持し、これにより歩行周期 T の初めより力学的エネルギーを増幅する、ことを特徴とする請求項 5 に記載の二足歩行ロボットの歩行制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、二足歩行ロボットとその歩行制御方法に関する。

【背景技術】

【0002】

膝関節のない二足歩行ロボットとして、非特許文献 1 の「2 足型脚車輪移動システム」が広く知られている。この 2 足型脚車輪移動システムは、脚先に同軸の 2 輪を備えた 2 本の脚が、股関節により結合された 4 輪の脚車輪移動システムである。股関節は 2 本の脚を前後方向に送り、脚は脚先と股関節までの長さを変え脚の長さを伸縮できる。同軸の 2 輪間の距離は充分長く、重心をまたいでいるため左右方向のバランスは保たれ、どちらか一方の脚で立つことができる。

車輪を回したり脚構造を変えるためのモータの数は、脚関節の脚交叉用モータ 1 個、両脚の伸縮用モータ 2 個、両脚先の車輪回転用モータ 2 個の計 5 個である。それぞれのモータは角度センサとしてロータリエンコーダを内蔵している。また、両脚には傾斜角速度セ

10

20

30

40

50

ンサとしてレートジャイロが取り付けられている。

【0003】

図13は、上述したシステムによって階段を昇る場合の1歩分のシーケンスを示す図である。また、全く逆の手順で降りることができる。このシーケンスを繰り返すことによって、連続した階段昇降を実現できる。このシステムは、片脚接地の場合に接地車輪軸の真上近辺で重心位置を巧みに移動し、3段を4歩で昇降する階段昇りを約13秒で実現している。

【0004】

また、二足歩行ロボット（例えば図14に示すコンパス型ロボット）は、適当な初期値を与えることで、図15のように緩やかな下り斜面上をアクチュエータを用いることなく、受動的に歩行することができることが知られている。

非特許文献2、3の「二足歩行ロボット」は、このコンパス型ロボットの受動歩行メカニズムを規範として、進行方向に仮想重力場を想定し、その各質点への影響を関節トルクに等価変換することで、平地動歩行を実現するものである。さらにこれを発展させたエネルギー拘束制御や膝関節モデルへの拡張等が開示されている。

【0005】

一方、膝関節を有する二足歩行ロボットは、広く知られており、例えば、特許文献1～5に開示されている。

【0006】

【非特許文献1】「世界初！2足型脚車輪移動システムを開発」、通商産業省 工業技術院 機械技術研究所、2001年3月31日、インターネット<URL:http://www.mel.go.jp/soshiki/tokatsu/press/h10-9-25/H10-9-25.html>

【非特許文献2】浅野、羅、山北：“受動歩行を規範とした2足ロボットの歩容生成と制御”、日本ロボット学会誌、Vol.22、No.1、pp.130-139、2004年1月

【非特許文献3】浅野、羅、山北：“可変仮想重力による歩容生成手法の統一と制御性能解析”、日本機械学会、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2004年6月

【0007】

【特許文献1】特開平9-94785号公報、「脚式歩行ロボットの歩容生成方法」

【特許文献2】特開2001-79788号公報、「歩行ロボットの歩容制御方法」

【特許文献3】特開2003-340763号公報、「2足歩行ロボットの階段昇降方法及び2足歩行ロボット」

【特許文献4】特開2004-114243号公報、「歩行ロボットの歩行歩容生成装置」

【特許文献5】特開2004-299035号公報、「脚式二足歩行ロボットの足および脚式二足歩行ロボット」

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

上述した従来二足歩行ロボットの制御においては、安定に歩行を行うための指標として、ZMP (Zero Moment Point) と呼ばれる床反力の中心点が用いられてきた。ZMP (Zero Moment Point) とは、ロボットの足裏内にある「床反力の中心点」を意味し、この点を中心に、足部にはたらく回転モーメントがゼロになる。

ZMPは、足部の厚さと質量が無視できるとすると、足首トルクを u_1 、床反力の鉛直方向成分をRとすれば $ZMP = -u_1 / R$ で計算される。

【0009】

ZMPが足裏内になれば、足部が爪先や踵を中心に回転し、足底が浮き上がることになる。二足歩行ロボットの制御は、足底が床面に接地していない状態では非常に困難となるため、通常はZMPを足裏内に納まるように制御する。この足底が浮き上がる臨界状態

10

20

30

40

50

を「Tilt限界」と呼ぶ。

床反力Rは、定常歩行時にはそれほど変動が激しくないで、ZMPの変動は足首トルク u_1 が大きく影響する。この結果、Tilt限界を越えないようなZMPを達成するために、足首トルク u_1 に厳しい制約が発生する。

足首トルクはロボットの重心移動速度に最も大きく影響が現われる関節トルクである。従って、足首トルクの制約は、歩行速度の上昇の妨げとなる。

【0010】

上述したように、ZMPの必要条件を満たす(すなわちZMPを足裏内に納まるように制御する)ために、足首トルクに厳しい制約があり、その結果としてロボットの歩行運動に大きな制約を与えるため、ダイナミックな歩行運動の実現を困難とし、歩行速度の上昇にも大きな障害となっていた。

10

【0011】

言い換えれば、この問題の本質は、電気モータなどの回転駆動力を用いている点にある。すなわち従来のヒューマノイドロボット技術では、主に回転駆動力を駆動源として用いていたため、作用・反作用の法則により、脚を駆動する場合には足部など脚以外のリンクが更に必要となる。この結果、ZMPの問題が発生する。

【0012】

また、従来の膝関節のないコンパス型ロボットは、遊脚が床面を削る現象を本質的に回避できなかった。

【0013】

本発明は上述した問題点を解決するために創案されたものである。すなわち、本発明の目的は、シンプルな機構で平地歩行ができ、障害物回避や不整地歩行へも適応でき、ZMPの問題を本質的に回避して、従来と比較して大幅な歩行速度の向上が実現できる二足歩行ロボットとその歩行制御方法を提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【0014】

本発明によれば、歩行面と接触して滑らない足部を下端に有する1対の細長い脚と、該1対の脚を歩行方向に交互に揺動可能に連結する腰部と、各脚の重心より上部を伸縮させる伸縮アクチュエータと、該伸縮アクチュエータを制御する制御装置とを備え、脚の一方を支持脚、他方を遊脚として、交互に片脚で支持しながら歩行する二足歩行ロボットであって、

30

前記制御装置により、支持脚を伸びた状態で保持し、遊脚を支持脚よりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させる、ことを特徴とする二足歩行ロボットが提供される。

【0015】

本発明の好ましい実施形態によれば、前記各脚の重心より上部に、前記伸縮アクチュエータと並列に伸縮に抗する弾性体を備える。

【0016】

また、前記1対の脚を歩行方向に交互に揺動駆動する股関節アクチュエータを備える、ことが好ましい。

40

【0017】

また、前記足部は、歩行方向に凸曲面状の足裏を有する、ことが好ましい。

【0018】

また、本発明によれば、歩行面と接触して滑らない足部を下端に有する1対の細長い脚と、該1対の脚を歩行方向に交互に揺動可能に連結する腰部と、各脚の重心より上部を伸縮させる伸縮アクチュエータと、該伸縮アクチュエータを制御する制御装置とを備え、脚の一方を支持脚、他方を遊脚として、交互に片脚で支持しながら歩行する二足歩行ロボットの歩行制御方法であって、

支持脚を伸びた状態で保持し、遊脚を支持脚よりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させる、ことを特徴とする二足歩行ロボットの歩行制御方法

50

が提供される。

【0019】

本発明の好ましい実施形態によれば、支持脚交換の衝突から次の衝突までに要する歩行周期 T に対し、その衝突の瞬間から遊脚伸縮部が再び伸び切るまでの目標整定時間 T_{set} を歩行周期 T よりも短く設定し、歩行周期 T の初めから目標整定時間 T_{set} まで遊脚を支持脚よりも短く伸縮させ、目標整定時間 T_{set} 以降は支持脚と同一の伸びた状態で保持し、これにより歩行周期 T の初めより力学的エネルギーを増幅する。

【発明の効果】

【0020】

上述した本発明の構成及び方法によれば、支持脚を伸びた状態で保持し、遊脚を支持脚よりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させるので、脚の伸縮力、すなわち脚自身でエネルギーの増幅が行えるため、足首トルク u_1 を必要としない。 10

従って、 $ZMP (= -u_1 / R)$ は、実質的に0となり、 ZMP を足裏内に納まるように制御することなく、足底が床面に接地している状態を保持することができる。これにより、 ZMP の拘束条件に支配されることなく、歩容生成を確実に実現することができる。

また、歩容生成において足首関節の駆動が解放されるという点は、足首関節の他の目的での利用可能性を示唆するものであり、更に多様な制御の実現も期待される。

さらに足裏の形状（例えば、歩行方向に凸曲面状、例えば円弧の足裏）や弾性要素（伸縮アクチュエータと並列に伸縮に抗する弾性体）を利用することで、高い機動性と省エネルギー化を達成することができる。 20

またさらに、脚の伸縮により障害物回避や不整地への適応性が高まることも、後述する実施例で確認された。

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

本発明における用語を以下のように定義する。

「歩容」とは、「歩き方」または「歩行パターン」を意味する。

「動的歩容生成」とは、「動歩行の定常歩行パターンを生成する」ことを意味する。

「パラメータ励振」は、ブランコの立ち漕ぎなどに見られる物理現象であり、外部からエネルギーを注入しなくとも、内的な重心移動により発生する励起現象のことを意味する。 30

「パラメトリック励起」とは、パラメータ励振を引き起こす励起を意味する。

「歩行周期」とは、支持脚交換の衝突から、次の衝突までに要する時間である。

「整定時間」とは、その衝突の瞬間から、遊脚伸縮部が再び $b [m]$ に伸び切る（厳密に再び $b [m]$ となる）までの時間である。

【0022】

以下、本発明の好ましい実施例を説明する。なお各図において、共通する部分には同一の符号を付し、重複した説明を省略する。

【実施例1】

【0023】

1 はじめに

非特許文献2、3における動的歩容生成問題は、数理的には位相空間におけるリミットサイクルの生成問題として捉えられる。リミットサイクル型歩容では、受動歩行に代表されるように、インパクト現象による瞬間的な支持脚交換（両脚支持期が存在しない）が一つの大きな特徴となっている。

歩行サイクルおよびその生成法は無数に存在するが、すべてに共通する必要条件是、支持脚交換時の遊脚と床面との衝突で失われる力学的エネルギーの回復である。このことから、自然で効率の良い歩容の生成は、「片脚支持期に如何にして効率的な力学的エネルギーの回復を達成するか」、という問題に帰着される。 40

本発明の発明者らはこれまでに、主にコンパス型モデルを用いて、受動歩行現象の発生メカニズムについて研究してきた。そして、動的歩容生成の本質的問題として、上記に述べた結論を得た。

【0024】

現在までに、他にも様々な歩容生成方法が提案されてきたが、着目しているロボットの力学的構造に差こそあれ、結果として力学的エネルギー回復を行っていることに違いはない。しかしながら、次に挙げる疑問点が不明瞭なまま残されていた。

(1) コンパス型モデルでは、歩容生成において足首トルクを0にすることができない。つまり、腰トルクのみでは歩容生成のための適切なエネルギー回復を達成できない。

(2) これまでに劣駆動(腰トルクのみ)で平地歩行を実現させている研究例では、必ず膝関節を有するモデルを扱っている。 10

以上の客観的事実から、発明者らは膝関節の有無が歩容生成において重大な差異を生じるのではないかと考察していた。

一方、脚の伸縮により平地における動的歩容生成が可能であることを、実験機を用いて発見的に示した例があり、これも劣駆動での平地歩行に成功した一例であるが、その力学的メカニズムについては現在でも不明なままである。

【0025】

以上を総括すると、これまでに平地動歩行に成功した劣駆動二足ロボットでは「片脚支持期において、(屈曲・伸縮など)脚の構造が変化する」という共通点を有している。この事実から、発明者らは「脚の構造変化が力学的エネルギーの増幅や振動の助長を引き起こし、結果として歩行を創発させるのではないかと考えた。 20

【0026】

構造変化のための機構としては、遊脚の膝関節(回転系)と伸縮脚(直動系)の二つの機構が考えられる。

このうち膝関節による効果(ただし腰トルク利用)は、自励振動(Self excited oscillation)により説明できる。一方、伸縮脚による効果は、パラメータ励振(Parametric excitation)により説明することができる。これは、ブランコやクレーンなどに見られる身近な現象であり、制御工学の分野においても、可変長振子系の振動問題として知られている。 30

【0027】

以上の考察に基づき本発明の実施例1では、シンプルな伸縮脚モデルに対する基礎的な制御則の提案とその有効性の確認を通して、パラメータ励振現象による力学的エネルギー回復に基づく歩容生成メカニズムについて検証した。

【0028】

2 二足歩行ロボットのモデル

図1は、本発明による二足歩行ロボットの第1実施例の構成図である。

この図に示すように、本発明の二足歩行ロボット10は、1対の細長い脚12、腰部14、伸縮アクチュエータ16、及び制御装置20を備え、脚12の一方を支持脚12a、他方を遊脚12bとして、交互に片脚で支持しながら歩行する二足歩行ロボットである。 40

【0029】

1対の細長い脚12は、歩行面1と接触して滑らない足部13を下端に有する。足部13は、歩行方向に凸曲面状(例えば円弧)の足裏13aを有するのがよい。

腰部14は、1対の脚12を歩行方向に交互に揺動可能に連結する。なお、この連結部はこの例では抵抗がなく、損失なしに自由に揺動できるようになっている。

伸縮アクチュエータ16は、各脚12の重心より上部を伸縮させる直動アクチュエータである。この直動アクチュエータは、数値制御可能な電動シリンダ、又は液圧又は空圧のシリンダであるのが好ましい。

【0030】

制御装置20は、二足歩行ロボット10に搭載され、或いは外部に設置されたコンピュ 50

ータ（例えば、PC）であり、伸縮アクチュエータ16を制御する。この制御装置20により、支持脚12aを伸びた状態で保持し、遊脚12bを支持脚12aよりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させるようになっている。

【0031】

図1で示す平面二足ロボット10は、以下の(1)～(5)の条件を満たすものとする。

- (1) 支持脚12aは床面1と常に1点で接触し滑べらない。
- (2) 支持脚12aの脚長は変化しない。つまり、図で $a_1 = a$ 、 $b_1 = b$ [m]で固定する（ a 、 b は定数値である）。また、 $L = a + b$ [m]とする。
- (3) 遊脚12bは図で b_2 部分が直動型アクチュエータ16により伸縮可能である。これ以外の部所に駆動源は持たない。 10
- (4) 遊脚12bと床面1との衝突は完全非弾性衝突とする。
- (5) 脚12の慣性モーメント I は直動関節（腰部14）以下の部分だけに依存するものであり、伸縮により値が変化しない。

【0032】

ロボットの運動方程式は、数1の式(1)で与えられる。ただし、 $M \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は慣性行列、 $h \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ はコリオリ力・遠心力・重力を表すベクトル、 $Su \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ は制御入力である。

一般化座標は、数1の式(2)で示す、脚の鉛直方向からの相対角度および遊脚の伸縮部の長さの計3つをとった。 20

本モデルでは、各関節において回転トルクは発生できず、脚に直動型アクチュエータのみが搭載されていると仮定しているので、 u [N]は伸縮力であり、 $S := [0 \ 0 \ 1]^T$ である。

【0033】

【数1】

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Su \quad (1)$$

$$q := [\theta_1 \ \theta_2 \ b_2]^T \quad (2)$$

30

【0034】

3 制御系設計

遊脚の伸縮部 b_2 の目標軌道追従制御を考える。出力として、数2の式(3)をとると、その2階微分は数2の式(4)となる。これに対して、制御入力 u を数2の式(5)(6)のように設定する。

【0035】

【数 2】

$$b_2 = S^T q \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{b}_2 &= S^T \ddot{q} \\ &= S^T M(q)^{-1} (Su - h(q, \dot{q})) \\ &= S^T M(q)^{-1} Su - S^T M(q)^{-1} h(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$u = (S^T M^{-1} S)^{-1} (\ddot{u} + S^T M^{-1} h) \quad (5)$$

$$\ddot{u} = \ddot{b}_{2d} + k_d(\dot{b}_{2d} - \dot{b}_2) + k_p(b_{2d} - b_2) \quad (6)$$

10

【0036】

ただし、 k_d 、 k_p はそれぞれ、微分ゲインと比例ゲイン（正定数）である。ここで、以下の（1）～（3）の条件および力学的性質を考える。

（1）安定歩容生成のためには、力学的エネルギーの回復をサイクル前半（ $Xg < 0$ の範囲）である程度行う必要がある。

（2）遊脚12bの接地時には、遊脚の長さが完全に元に戻る（支持脚12aの長さと同じになる）。

（3）サイクル初期に脚長を縮小させても、パラメータ励振の効果は得られにくい。

以上の事項とスムーズな脚伸縮運動の実現（連続微分可能性）を考えて、この例では数3の式（7）の時間軌道を設定した。

【0037】

【数 3】

$$b_{2d}(t) = \begin{cases} b - A \sin^3\left(\frac{\pi}{T_{set}} t\right) & (t \leq T_{set}) \\ b & (t > T_{set}) \end{cases} \quad (7)$$

30

【0038】

T_{set} [s] は目標整定時間であり、遊脚の接地よりも先に起こるものとする。つまり、歩行周期を T [s] とするとき、 $T > T_{set}$ が成り立つと仮定する。また、インパクトの瞬間は $b_2 = b$ が完全に成立しているものとして衝突判定し、衝突方程式は2リンクモデルのものを用いる。

【0039】

4 数値シミュレーション

数値解析を通して、歩容の特徴と制御パラメータに伴う挙動の変化について考察する。ロボットの物理パラメータは、 $m = 5.0$ [kg]、 $I = 0.1$ [kg·m²]、 $L = 1.0$ 、 $R = 0.5$ [m] とした。

40

【0040】

4.1 典型的挙動

図2にシミュレーション結果を示す。PDゲインは $k_d = 60.0$ 、 $k_p = 900.0$ と設定した。（a）角度、（b） b_2 、（c）力学的エネルギーの各時間変化である。ZMPは R_1 [m] で計算できるので省略する。

図2（b）より、目標軌道追従制御はほぼ完全に達成されており、 b_2 は衝突前に元の値 b に戻されていることが確認できるが、図2（c）より力学的エネルギーは、より高いレベルに収束している（つまり増幅されている）ことが分かる。

【0041】

図3はスティック線図である。脚伸縮機構はエネルギー回復と同時に遊脚が床面から離

50

れており障害物回避の機能も有している。従って、脚移動においては有利な形態と言える。

【0042】

4.2 T_{set} の変動に伴う挙動の変化

[rad] は数4の式(8)で示すインパクト時の股関節角度の半角である。ただし、“-”、“+”はそれぞれインパクト直前、直後を表す。これを用いて、歩行速度 v [m/s] を数4の式(9)で定める。また、回復エネルギー E [J] を数4の式(10)で定める(ただし1周期歩行の場合のみ)。

【0043】

【数4】

$$\alpha := \frac{\theta_1^- - \theta_2^-}{2} = \frac{\theta_2^+ - \theta_1^+}{2} > 0 \quad (8)$$

$$v := \frac{2(R\alpha + (1-R)\sin\alpha)}{T} \quad (9)$$

$$\Delta E := E(T^-) - E(0) \quad (10)$$

10

20

【0044】

回復エネルギー E は、パラメータ励振現象の効果で1サイクル中に増幅されたエネルギーの値であり、インパクト時に消散する値に等しい。

$a = 0.50, 0.60, 0.70$ [m] の各場合について、安定歩容が生成可能な全領域に渡って T_{set} を変動させた。

【0045】

図4に解析結果を示す。(a)歩行周期、(b)、(c)歩行速度、(d)回復エネルギー、の各結果である。 T_{set} が小さい場合には、歩容が減衰し、安定リミットサイクルに収束しない結果となったが、大きい場合には、減衰しなくとも $T > T_{set}$ が成立しなくなったため、「歩容生成不可」とであると判断した。図4(a)に45°線を示したのはその確認のためである。また同図から、重心位置 a により、整定時間の余裕に差が生じることが分かる。

30

図4(b)(d)より、歩幅と回復エネルギー値は T_{set} に対して単調増加の傾向にあることが分かる。図4(c)より $a = 0.50$ 以外の場合では、歩行速度に最大値が存在していることから、エネルギー効率に関して最適な T_{set} が存在することも考えられる。また、腰質量の有無など、歩行モデルに差はあるものの、仮想受動歩行などの回転駆動系による結果と比較すると、かなり高い機動性を実現していることにも注目したい。

【0046】

4.3 A の変動に伴う挙動の変化

$a = 0.50$ [m]、 $T_{set} = 0.55$ [s] の場合について、式(7)における A の変動に伴う歩容の変化を観察した。図5に結果を示す。(a)に示したように、この場合も歩行周期に関して $T > T_{set}$ が成立する範囲において「歩容生成可能」と判断した。 $A = 0.107$ [m] 付近から分岐が起こり、2周期歩容となった。このとき、 T が2周期となるため(それぞれ T_i ($i = 1, 2$) とする)、歩行速度 v_i も数5の式(11)で再定義した。

40

【0047】

【数 5】

$$v_i := \frac{R(\alpha_1 + \alpha_2) + (l - R)(\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)}{T_i} \quad (i = 1, 2) \quad (11)$$

【0048】

歩容が2周期へ移行すると同時に、 $d_{12} / dt > 0$ が成立しなくなった。このことが、分岐現象（挙動の複雑化）に大きく関与している可能性もある。 10

【0049】

本発明の方法は、図1に示した二足歩行ロボットの歩行制御方法であって、支持脚12aを伸びた状態で保持し、遊脚12bを支持脚12aよりも短く伸縮させて、パラメータ励振により力学的エネルギーを回復させることを特徴とする。

また、例えば式(7)に示したように、交互に片脚で支持する歩行周期Tに対し、歩行周期Tよりも短い目標整定時間 T_{set} を設定し、歩行周期Tの初めから目標整定時間 T_{set} まで遊脚12bを支持脚12aよりも短く伸縮させ、目標整定時間 T_{set} 以降は支持脚12aと同一の伸びた状態で保持し、これにより歩行周期Tの初めより力学的エネルギーを増幅する。 20

【0050】

上述したように、下り斜面の受動歩行のメカニズムを平地へ継承するこれまでの方法では、仮想重力などによる外部からのエネルギーの注入が必要であった。これに対し本発明の方法は、ロボットが自らの構造を変化させることで内的にエネルギーを増幅しており、これが従来の方法と本質的に異なる点である。

脚の伸縮機能の実現には、様々な機構が考えられるため、エネルギー効率に関しては回転駆動系との比較を容易に行えない。力学系としての挙動は等価であっても、どのような機構を採用するかにより効率も大きく変わるものと考えられる。

本発明で示したロボットのエネルギーパターンは、仮想受動歩行などの回転駆動系のそれに比べ、人間に非常に近いものとなっている点も注目される。 30

【実施例2】

【0051】

1. はじめに

発明者らは、擬似受動歩行の歩容生成メカニズムを力学的エネルギーの観点から再考し、その根底にパラメータ励振現象が在ることを見出した。実施例1ではその基本的な脚伸縮制御則の提案と力学系としての挙動に関する基礎的考察を行い、制御パラメータの変動に伴う分岐現象の発生などについて報告した。

従来回転駆動モデルでは、与えられた目標エネルギー条件への完全モデルマッチングを行うことで歩容を生成していたのに対し（例えば、非特許文献3）、本発明で提案する方法はロボット自らが脚を構造変化（上下動）させることでエネルギーを増幅し歩行を創発するという点で本質的に異なる。また機能的な面でも、遊脚の地面との衝突回避が同時に達成され合理的である。更にこの方法では回転駆動力、特に足首トルクを主として要求しないため、ZMP（Zero Moment Point）の問題を大幅に緩和することができる。 40

【0052】

しかし提案する脚伸縮制御においては、目標軌道追従のために全脚質量を打ち消すだけの制御トルクが必要となるため、その効率が懸念されていた。この問題に対し本発明では、駆動部の負担軽減のために弾性要素を導入したモデルを新たに考える。評価関数を導入し、エネルギー効率を解析することで、そのパワーアシスト効果を確認する。更には、回転駆動力の併用や制御応用についても考察する。 50

【 0 0 5 3 】

2 . 基本的概念

2 . 1 パラメータ励振現象

パラメータ励振 (Parametric Excitation) は、ブランコやクレーンなどにおいて見られる身近な物理現象であり、制御の分野においても可変長振子系問題として広く研究されてきた。本発明ではそのエネルギー増幅メカニズムの動的歩容生成への応用を考える。

力学的エネルギーの増幅が最大となる最適制御を図 6 に示す。A からスタートし、 $B = 0$ となった瞬間に l_0 から l_1 へ、D で $d / dt = 0$ となった瞬間に l_1 から l_0 へと瞬間的に振子長を変えることで、振幅とエネルギーの増加量が共に最大となる。

10

【 0 0 5 4 】

2 . 2 二脚ロボットのモデル

実施例 1 の図 1 に示した伸縮脚ロボットの運動方程式は、実施例 1 の式 (1) で与えられる。支持脚は伸縮部を機械的にロックすることで、常に $a_1 = a = 0.50$ 、 $b_1 = b = 0.50$ [m] が成り立っていると仮定する。

2 . 3 動的歩容生成

出力として実施例 1 の式 (3) をとり、その目標軌道 $b_2 d$ への追従制御を考える。 b_2 の 2 階微分は式 (4) となるので、これに対して制御入力 u を式 (5) (6) のように設定すれば良い。

目標軌道 $b_2 d$ については、脚のスムーズな伸縮動作を考慮して、速度までが連続微分可能となるように式 (7) の関数を設定した。

20

実施例 1 の図 3 に示したスティック線図 (右が進行方向) から推察されるように、遊脚の伸縮運動のピークは $b_2 < 0$ の領域にシフトしていることが分かる。

【 0 0 5 5 】

3 . 弾性要素の利用による高効率化

発明者らがこれまでに扱ってきた回転駆動系では、エネルギーの単調な回復を実現できるため、余分なエネルギー注入が無く効率的であった。これに対しパラメータ励振の場合は、脚の上下動を行うため、一旦増幅した位置エネルギーを再び失う結果となり、回転駆動系に比べて非効率となる。この問題を克服するために、脚部に弾性要素を搭載したモデルを新たに創案し、エネルギー効率について解析、検討した。

30

【 0 0 5 6 】

3 . 1 弾性モデル

図 7 は、本発明による二足歩行ロボットの第 2 実施例の構成図である。この例は、第 1 実施例の脚部に弾性体 18 を備えたものである。すなわち、各脚 12 の重心より上部に、伸縮アクチュエータ 16 と並列に伸縮に抗する弾性体 18 を備える。

弾性体 18 は、例えば直動バネであり、その弾性係数を k [N / m]、自然長を b_0 [m] とする。その他の構成は、第 1 実施例と同様である。

【 0 0 5 7 】

このとき、ロボットの運動方程式は数 6 の式 (12) で与えられる。ただし、 Q [J] は数 6 の式 (13) の弾性エネルギーである。バネの伸縮に関する座標系は、簡単のため図 7 (B) のように設定する。

40

【 0 0 5 8 】

【 数 6 】

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Su - \frac{\partial Q}{\partial q^T} \quad (12)$$

$$Q := \frac{1}{2}k(b_2 - b_0)^2 \quad (13)$$

【 0 0 5 9 】

50

3・2 エネルギー効率解析

歩行速度 v [m / s] と平均パワー p [m / J] を数 7 の式 (1 4) (1 5) で定める。ただし、 X_g [m] はロボットの重心の水平位置である。

【 0 0 6 0 】

【 数 7 】

$$v := \frac{1}{T} \int_0^T \dot{X}_g dt = \frac{\Delta X_g}{T} \quad (14)$$

$$p := \frac{1}{T} \int_0^T |b_2 u| dt \quad (15)$$

10

【 0 0 6 1 】

これらを用いて、エネルギー効率を v / p [m / J] で定める。これは単位エネルギー供給量に対する移動可能距離を表すものであり、空間的評価量と捉えられる。本発明では力学系本来の性能を評価するために、完全モデルマッチング制御の適用を考え、制御入力を連続時間信号として数 8 の式 (1 6) で与えてシミュレートした。

【 0 0 6 2 】

【 数 8 】

$$u = \left(S^T M^{-1} S \right)^{-1} \left(\ddot{b}_{2d} + S^T M^{-1} \left(h + \frac{\partial Q}{\partial q^T} \right) \right) \quad (16)$$

20

【 0 0 6 3 】

まず b_0 を固定した場合の k の変動に伴うエネルギー効率 v / p の変化を観測した。図 8 (a) に $A = 0.08$ [m]、 $T_{set} = 0.55$ [s] としたときの解析結果を示す。 $b_0 = 0.50$ 以外の場合は、最適な k の値がそれぞれに存在している。 $k = 0$ のときの効率 0.071 [m / J] と比較すると、適当な b_0 に対し適切な k を設定することで、劇的な高効率化が達成されることが分かる。ただし $b_0 = 0.50$ の結果が示すように、バネの剛性をどのように設定しても効率が悪化する場合があるので注意が必要である。

30

【 0 0 6 4 】

次に k を固定した場合の b_0 の変動に伴う効率を解析した。結果を図 8 (b) に示す。各 k に対して、最適な b_0 が存在していることが分かる。

【 0 0 6 5 】

図 8 において、移動効率を v / p [m / J] で定義しているが、これは 1.0 [J] のエネルギー源が与えられた場合の移動可能距離を表す。従って、移動効率の値が大きいほど長距離を歩行でき、つまり効率が良い、ことを意味する。

図 8 (a) (b) いずれも、バネの無い状態では 0.071 [m / J] であるが、バネを利用することで最大 0.330 [m / J] まで効率が上昇している。この比から、約 5 倍の効率の向上と判断できる。

40

【 0 0 6 6 】

図 8 において、 b_0 が 0.46 以上の場合には、(a) の $b_0 = 0.50$ のケースで観測されたように、弾性要素が効率を悪化させる結果となっている。特に $b_0 = 0.46$ つまり $b_0 = b - A / 2$ (自然長が伸縮運動の中心) のときは k の値に依らずに、 $k = 0$ における効率に等しくなっている。この理由を以下に考察する。

式 (1 6) において弾性力項以外の部分を u_0 とすると、 u は数 9 の式 (1 7) のように書き直すことができる。

【 0 0 6 7 】

【数 9】

$$u = u_0 + k(b_2 - b_0) \quad (17)$$

【0068】

kがある程度の大きさまでの範囲であれば、uはサイクル中、常に負の値をとる（解析結果は略）。よって db_2/dt の符号を考慮することで、パワー計算における絶対値を数10の式(18)のように示すことができる。

ここで、弾性力項について数10の式(19)の積分値が得られる。

この結果、式(18)は式(20)となり、kの値に依らずに $k=0$ における効率に等しくなることが分かる。この事実は、弾性要素の機械インピーダンスの設計指標として重要である。

【0069】

【数10】

$$\begin{aligned} \int_0^T |\dot{b}_2 u| dt &= \int_0^{T_{set}/2} \dot{b}_2 u dt - \int_{T_{set}/2}^{T_{set}} \dot{b}_2 u dt \\ &= \int_0^{T_{set}/2} \dot{b}_2 (u_0 + k(b_2 - b_0)) dt \\ &\quad - \int_{T_{set}/2}^{T_{set}} \dot{b}_2 (u_0 + k(b_2 - b_0)) dt \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^{T_{set}/2} k \dot{b}_2 (b_2 - b_0) dt &= \left[\frac{1}{2} k (b_2 - b_0)^2 \right]_{b_2=b_0+\frac{A}{2}}^{b_2=b_0-\frac{A}{2}} = 0 \\ \int_{T_{set}/2}^{T_{set}} k \dot{b}_2 (b_2 - b_0) dt &= \left[\frac{1}{2} k (b_2 - b_0)^2 \right]_{b_2=b_0-\frac{A}{2}}^{b_2=b_0+\frac{A}{2}} = 0 \quad (19) \end{aligned}$$

$$\int_0^T |\dot{b}_2 u| dt = \int_0^{T_{set}/2} \dot{b}_2 u_0 dt - \int_{T_{set}/2}^{T_{set}} \dot{b}_2 u_0 dt \quad (20)$$

【0070】

図9は $b_0 = 0.30$ の場合の $db_2/dt \cdot u$ の時間積分値、つまり制御入力によるエネルギーの増加量をプロットしたものである（ただしインパクト時に値をリセットしている）。 b_0 がこの値のとき、 $k = 225$ が最適値であるが（図8(a)参照）、結果からも無駄なエネルギーロスが無く、最も単調なエネルギー回復が達成されていることが確認できる。

【0071】

4. 機能の拡張と制御応用

4.1 ハイブリッド駆動制御

脚の伸縮力に股関節の回転トルク u_H を併用することで、歩行性能の向上が期待できる。この場合のロボットの運動方程式は、数11の式(21)で与えられる。

【0072】

20

30

40

【数 1 1】

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Su + \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} u_H \quad (21)$$

【0073】

エネルギー回復を助長する u_H の一つの候補として、本発明では $u_H = (d_1 / dt - d_2 / dt)$ を考えた。 > 0 は定数ゲインである。この制御入力は、常に力学的エネルギーの回復に貢献するものである。

さらに、1対の脚 1 2 を歩行方向に交互に揺動駆動する股関節アクチュエータ 2 1 を備えるのが好ましい。

図 10 は の変動に伴う歩行周期 $T [s]$ (A) と回復エネルギー $E [J]$ (B) の変化を示したものである。股関節トルクの効果で、エネルギーの回復が促されると同時に、伸縮動作完了後の時間 ($t = T_{se t}$ から T まで) にも余裕が生じていることが分かる。この制御は、A が小さいときなど、脚伸縮だけでエネルギー回復が十分に達成できない場合に特に有効である。 $A = 0.10$ の場合は、 $= 0.12$ あたりから周期倍分岐が起こった。 の値が大きくなると、一般にこのような傾向が見られた。

【0074】

4・2 階段昇降への応用

次にハイブリッド駆動制御の効果を利用して、上り階段への適応を考える。一般に受動的歩行的な歩容生成アプローチでは、外乱に対するリミットサイクルのロバスト性が十分ではない。特にインパクト時の姿勢は次のサイクルに多大な影響を及ぼすため、平地以外への適応についてはこれまで殆ど議論されてこなかった。

【0075】

実際にシミュレーションを行い、適応性能について解析した。 $A = 0.08$ の場合、そのままの制御では段差 $0.1 [cm]$ までしか対応することができない。そこで、まず $A = 0.15$ とすると、段差 $2.1 [cm]$ まで対応可能となった。更に腰トルクを併用し $= 0.3$ とすると、段差 $3.0 [cm]$ まで対応可能となった。

【0076】

図 11 に段差 $2.0 [cm]$ の階段を昇るときのスティック線図を示す。この場合は十分なエネルギー回復を必要とするため、図のように脚の伸縮動作や遊脚の振幅も非常に大きくなる。式 (7) の目標軌道の改良をはじめ、階段昇降に適した伸縮軌道計画 (条件 $T > T_{se t}$ の排除など) を行うことで、より無駄の少ないダイナミックな適応が可能になると思われ、更なる性能向上が期待できる。

【0077】

4・3 足底円弧半径の調節による高速度化

足底円弧半径の調節により、歩行の高速度化が可能であることが知られている。図 12 は各 A に対して、R を $0.40 [m]$ から $0.70 [m]$ まで変化させたときの歩行周期 (A) と歩行速度 (B) の変化をプロットしたものである。各 A において、歩行速度が最大となる R が存在していることが分かる。一般に、R の値が小さくなると周期倍分岐が起こり、歩容生成が困難になる傾向が見られた。また、大きくなると $T_{se t} < T$ の関係が成り立たなくなり、歩容生成不可となった。

【0078】

5. まとめ

本発明ではパラメータ励振現象に基づく動的歩容生成に関して、伸縮部への弾性要素の導入に伴う高エネルギー効率化について考察し、数値解析を通してその特性を明らかにした。更に、幾つかの機能の拡張についても検討した。本発明で提案した制御方法およびメカニズムは、障害物回避や段差昇降の高効率かつダイナミックな実現を可能にするものと思われ、更なる発展が期待される。

10

20

30

40

50

【0079】

上述したように、遊脚に取り付けられた伸縮アクチュエータを利用し、単純な脚伸縮軌道への追従制御を行うだけで、パラメトリック励起を達成することができる。パラメータ励振現象の効果に従い、片脚支持期にエネルギーが増幅される結果、自動的に安定歩容が生成される。

「点から点への移動」という脚移動機械本来の目的と、「力学的エネルギーの増幅」という物理学的目的とを同時に達成することが可能な、大変合理的な歩行制御方法である。脚の上げ下ろしの様子は図3に示したスティック線図から良く分かる。

また、図7のように、直動アクチュエータと並列に弾性要素（直動バネ）を配置することで、伸縮アクチュエータの負担を軽減するパワーアシスト効果が得られ、エネルギー効

10

率を約5倍まで向上させることができる。さらにこのモデルでは、従来の子口ロボットとは異なり、足首関節に駆動力を必要としないため、ZMPの拘束から解放されるだけでなく、足部や足底の形状を自由に設計することができる。特に足裏を凸曲面状（例えば円弧）にすることで、従来と比較して大幅な歩行速度の向上が実現できる。

【0080】

本発明における駆動方法は、ロボット自身の力学的特性を十分に活用し、脚部の伸縮力のみで動的歩行を実現可能にするものである。

またこの方式では、一切の回転駆動力を必要としないため、足部の付加または利用において発生するZMPの制約問題を克服することができる。

20

さらには、脚の伸縮による障害物回避や不整地への適応など、機能的な面においても、従来開発されてきたロボットに比べシンプルな機構での実現を可能にしている。

工学的観点から、機構と機能の両面において、従来よりも優れた制御方法である。

【0081】

なお、本発明は上述した実施形態に限定されず、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々変更できることは勿論である。例えば、上述した実施例では、膝関節のない二足歩行ロボットについて詳述したが、本発明は膝関節を有する二足歩行ロボットにも同様に適用できる。

【図面の簡単な説明】

【0082】

30

【図1】本発明による二足歩行ロボットの第1実施例の構成図である。

【図2】図1の装置のシミュレーション結果である。

【図3】図1の装置のスティック線図である。

【図4】図1の装置の解析結果である。

【図5】図1のAの変動に伴う歩容の変化を示す解析結果である。

【図6】力学的エネルギーの増幅が最大となる最適制御を示す図である。

【図7】本発明による二足歩行ロボットの第2実施例の構成図である。

【図8】 b_0 と k の変動に伴うエネルギー効率 v/p の変化を示す図である。

【図9】制御入力によるエネルギーの増加量をプロットしたものである。

【図10】 b_0 の変動に伴う歩行周期 $T(A)$ と回復エネルギー $E(B)$ の変化を示したものである。

40

【図11】階段を昇るときのスティック線図である。

【図12】各Aに対して、Rを変化させたときの歩行周期(A)と歩行速度(B)の変化を示す図である。

【図13】非特許文献1の「2足型脚車輪移動システム」のシーケンス図である。

【図14】膝関節のないコンパス型ロボットの模式図である。

【図15】コンパス型ロボットの受動歩行を示すスティック線図である。

【符号の説明】

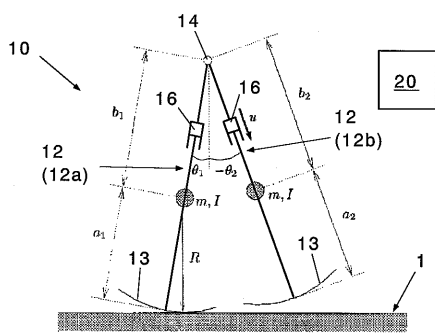
【0083】

1 歩行面、

50

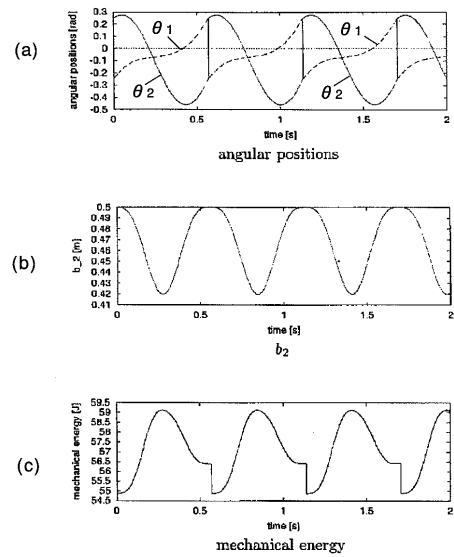
- 1 0 二足歩行ロボット、
- 1 2 脚、1 2 a 支持脚、1 2 b 遊脚、
- 1 3 足部、1 3 a 足裏、
- 1 4 腰部、1 6 伸縮アクチュエータ（直動アクチュエータ）、
- 1 8 弾性体（直動バネ）、2 0 制御装置、
- 2 1 股関節アクチュエータ

【 図 1 】



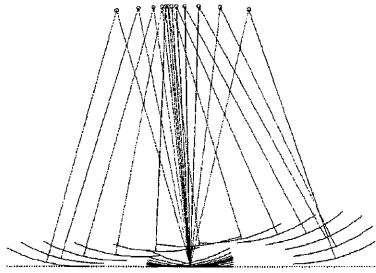
Model of a planar biped robot with telescopic leg

【 図 2 】



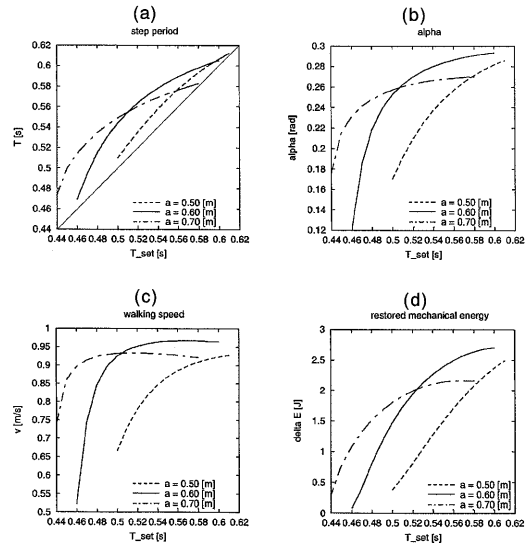
Simulation results

【 図 3 】



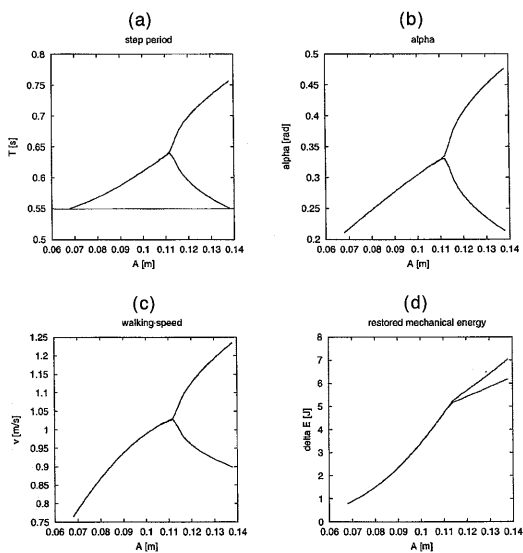
Stick diagram of dynamic walking where $\alpha = 0.50$, $A = 0.08$ [m] and $T_{set} = 0.55$ [s]

【 図 4 】



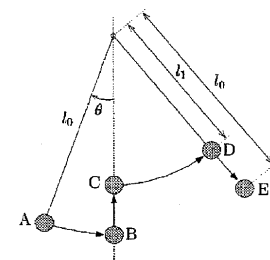
Simulation results of discrete events w.r.t. T_{set}

【 図 5 】



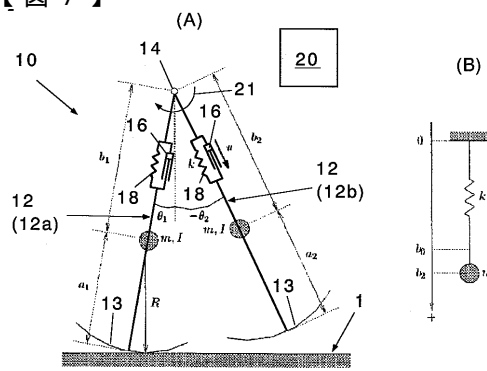
Simulation results of discrete events w.r.t. A

【 図 6 】



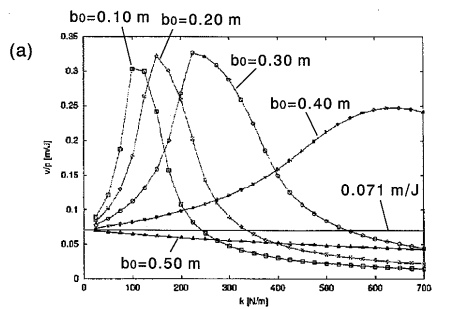
Optimal control to increase mechanical energy

【 図 7 】

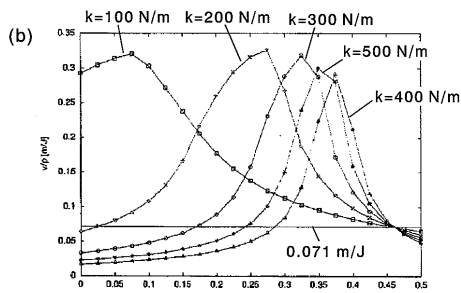


Telescopic legged model with elastic element

【 図 8 】



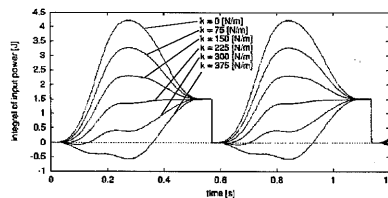
(a) v/p versus k



(b) v/p versus b_0

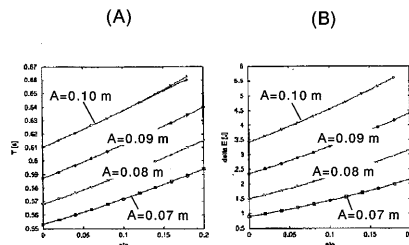
Analysis results of energy-efficiency where $A = 0.08$ [m] and $T_{set} = 0.55$ [s]

【 図 9 】



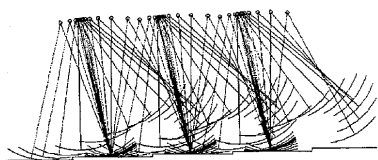
Integral of input power where $A = 0.08$ [m], $T_{set} = 0.55$ [s] and $b_0 = 0.30$ [m]

【 図 10 】



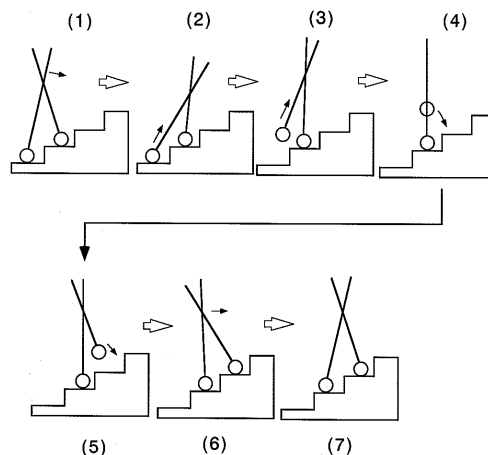
Step period and restored mechanical energy w.r.t. η where $T_{set} = 0.55$ [s]

【 図 11 】

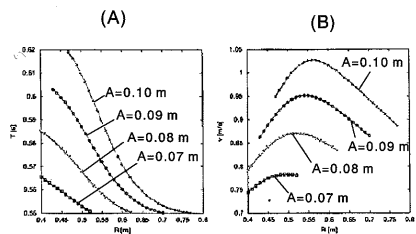


Stick diagram of dynamic walking going up the stairs with a level difference of 2.0 [cm] where $A = 0.15$ [m] and $T_{set} = 0.55$ [s]

【 図 13 】

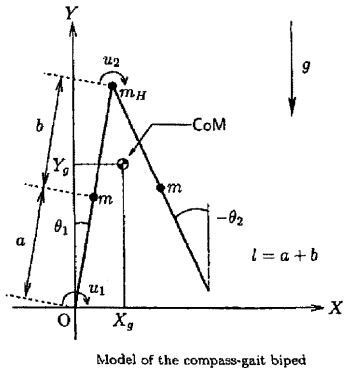


【 図 12 】

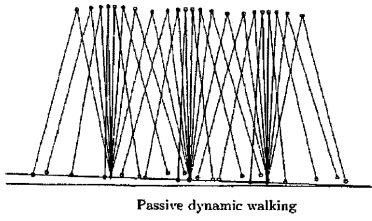


Step period and walking speed w.r.t. foot radius R

【 図 1 4 】



【 図 1 5 】



フロントページの続き

(72)発明者 羅 志偉

愛知県名古屋市守山区大字下志段味字穴ヶ洞2 2 7 1 - 1 3 0 サイエンスパーク研究開発センター内 独立行政法人理化学研究所 バイオ・ミメティックコントロール研究センター内

Fターム(参考) 3C007 CS08 HS02 HS14 HS26 HS27 WA03 WA13 WB05 WC22 WC23