

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5845334号
(P5845334)

(45) 発行日 平成28年1月20日(2016.1.20)

(24) 登録日 平成27年11月27日(2015.11.27)

(51) Int.Cl.

B25J 5/00 (2006.01)

F 1

B25J 5/00
B25J 5/00E
F

請求項の数 16 (全 45 頁)

(21) 出願番号 特願2014-501193 (P2014-501193)
 (86) (22) 出願日 平成24年3月20日 (2012.3.20)
 (65) 公表番号 特表2014-518774 (P2014-518774A)
 (43) 公表日 平成26年8月7日 (2014.8.7)
 (86) 國際出願番号 PCT/US2012/029848
 (87) 國際公開番号 WO2012/129250
 (87) 國際公開日 平成24年9月27日 (2012.9.27)
 審査請求日 平成27年3月13日 (2015.3.13)
 (31) 優先権主張番号 61/454,933
 (32) 優先日 平成23年3月21日 (2011.3.21)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(73) 特許権者 000005326
 本田技研工業株式会社
 東京都港区南青山二丁目1番1号
 (74) 代理人 100064414
 弁理士 磯野 道造
 (72) 発明者 ユン、セウンクック
 アメリカ合衆国、オハイオ州 43067
 -9705、レイモンド、21001 ス
 テート ルート 739、ホンダ パテン
 ツ アンド テクノロジーズ ノース ア
 メリカ エルエルシー気付

早期審査対象出願

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】ロボット制御方法および記憶媒体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

外部攪乱に反応して人型ロボットを制御するためのコンピュータ実行型の方
法であって、

前記人型ロボットは、非水平地面の第1の斜面を有する第1区域上で、かつ前記非水平地
面の第2の斜面を有する第2区域にまで踏み出せる範囲内に立ち、

前記方法は、ロボット制御装置が、

前記人型ロボットの状態情報を受信する受信ステップと、

前記非水平地面の第1区域あるいは前記非水平地面の第2区域のどちらに着地するかを決
定し、

前記人型ロボット並びに前記第1の斜面および前記第2の斜面の状態情報に基いて、
前記人型ロボットがその位置にまで足を動かせばバランスを維持するような位置を含む、
前記非水平地面の第1区域あるいは前記非水平地面の第2区域のどちらかである前記人型
ロボットの足の予測着地位置を決定する位置決定ステップと、

前記予測着地位置が所定の領域内である場合、

前記外部攪乱に反応して、前記人型ロボットを、制御して、足の踏み出しを用いずに姿
勢を変えさせることで、バランスを維持する第1バランス維持ステップと、

前記予測着地位置が前記所定の領域外である場合、

前記外部攪乱に反応して、前記人型ロボットを、制御して、前記予測着地位置まで足を
動かして降ろさせることで、バランスを維持する第2バランス維持ステップと、

10

20

を実行することを特徴とする方法。

【請求項 2】

前記位置決定ステップは、

前記人型ロボットを、同じ長さの第1の足と第2の足を表すリムなし車輪モデルとしてモデル化するステップを含み、

前記リムなし車輪モデルは、

前記人型ロボットの質量中心に対応する点質量と、

前記人型ロボットの第1の足に対応する第1のスポークと、

前記人型ロボットの第2の足に対応する第2のスポークと、を有することを特徴とする請求項1に記載の方法。

10

【請求項 3】

前記位置決定ステップは、

前記リムなし車輪モデルが存在する平面を決定するステップと、

前記リムなし車輪モデル用のアンカー点を決定するステップと、

力学モデルを適用し、前記アンカー点まわりの前記平面を用いて、前記リムなし車輪の動きをモデル化するステップと、

前記モデル化した動きを用いて、前記予測着地位置を、前記点質量が前記予測着地位置の上に位置することで前記リムなし車輪モデルが停止する地面上の点として決定するステップと、を備える

ことを特徴とする請求項2に記載の方法。

20

【請求項 4】

前記第1バランス維持ステップは、

前記状態情報に基いて、前記人型ロボットの目標線形運動量変化率と目標角運動量変化率とを決定するステップと、

バランス維持のために、前記目標線形運動量変化率、前記目標角運動量変化率、および、前記人型ロボットの物理的制約に基いて、許容線形運動量変化率と、許容角運動量変化率と、を決定するとともに、前記目標線形運動量変化率を、前記目標角運動量変化率よりも優先させてそのままにすることを決定するステップと、

前記許容線形運動量変化率と、前記許容角運動量変化率とを実現するために

30

複数の関節トルクを指示する制御出力情報を生成するステップと、

前記制御出力情報を、複数の関節トルクによって前記人型ロボットを動かす

複数の関節アクチュエータに出力するステップと、を備える

ことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項 5】

前記第2バランス維持ステップは、

前記予測着地位置までの足の踏み出しを実現するために、

前記状態情報に基いて、前記人型ロボットの目標線形運動量変化率と目標角運動量変化率とを決定するステップと、

バランス維持のために、前記目標線形運動量変化率、前記目標角運動量変化率、および、前記人型ロボットの物理的制約に基いて、許容線形運動量変化率と、許容角運動量変化率と、を決定するとともに、前記目標角運動量変化率を、前記目標線形運動量変化率よりも優先させてそのままにすることを決定するステップと、

40

前記許容線形運動量変化率と、前記許容角運動量変化率とを実現するために複数の関節トルクを指示する制御出力情報を生成するステップと、

前記制御出力情報を、複数の関節トルクによって前記人型ロボットを動かす複数の関節アクチュエータに出力するステップと、を備える

ことを特徴とする請求項1に記載の方法。

【請求項 6】

前記ロボット制御装置が実行する、

50

前記人型ロボットの質量点の中心の軌跡を決定するステップと、
前記予測着地位置までの足の踏み出しを実行する前記人型ロボットの振り足の軌跡を決定するステップと、をさらに備える
ことを特徴とする請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

外部搅乱に反応して人型ロボットを制御するためのコンピュータのプログラム命令を記憶する非一時的でコンピュータに読み取り可能な記憶媒体であって、

前記人型ロボットは、非水平地面の第 1 の斜面を有する第 1 区域上で、かつ前記非水平地面の第 2 の斜面を有する第 2 区域にまで踏み出せる範囲内に立ち、プロセッサによって実行されるときに、前記プログラム命令は、

前記人型ロボットの状態情報を受信する受信ステップと、
前記非水平地面の第 1 区域あるいは前記非水平地面の第 2 区域のどちらに着地するかを決定し、

前記人型ロボット並びに前記第 1 の斜面および前記第 2 の斜面の状態情報に基いて、前記人型ロボットがその位置にまで足を動かして降ろせばバランスを維持するような位置を含む、前記非水平地面の第 1 区域あるいは前記非水平地面の第 2 区域のどちらかである前記人型ロボットの予測着地位置を決定する位置決定ステップと、

前記予測着地位置が所定の領域内である場合、

前記外部搅乱に反応して、前記人型ロボットを、制御して、足の踏み出しを用いずに姿勢を変えさせることで、バランスを維持する第 1 バランス維持ステップと、

前記予測着地位置が前記所定の領域外である場合、

前記外部搅乱に反応して、前記人型ロボットを、制御して、前記予測着地位置まで足を動かして降ろさせることで、バランスを維持する第 2 バランス維持ステップと、
を前記プロセッサに実行させることを特徴とする記憶媒体。

【請求項 8】

前記位置決定ステップは、

前記人型ロボットを、同じ長さの第 1 の足と第 2 の足を表すリムなし車輪モデルとしてモデル化するステップを含み、

前記リムなし車輪モデルは、

前記人型ロボットの質量中心に対応する点質量と、

前記人型ロボットの第 1 の足に対応する第 1 のスポークと、

前記人型ロボットの第 2 の足に対応する第 2 のスポークと、を有する
ことを特徴とする請求項 7 に記載の記憶媒体。

【請求項 9】

前記位置決定ステップは、

前記リムなし車輪モデルが存在する平面を決定するステップと、

前記リムなし車輪モデル用のアンカー点を決定するステップと、

力学モデルを適用し、前記アンカー点まわりの前記平面を用いて、前記リムなし車輪の動きをモデル化するステップと、

前記モデル化した動きを用いて、前記予測着地位置を、前記点質量が前記予測着地位置の上に位置することで前記リムなし車輪モデルが停止する地面上の点として決定するステップと、を備える

ことを特徴とする請求項 8 に記載の記憶媒体。

【請求項 10】

前記第 1 バランス維持ステップは、

前記状態情報に基いて、前記人型ロボットの目標線形運動量変化率と目標角運動量変化率とを決定するステップと、

バランス維持のために、前記目標線形運動量変化率、前記目標角運動量変化率、および、前記人型ロボットの物理的制約に基いて、許容線形運動量変化率

と、許容角運動量変化率と、を決定するとともに、前記目標線形運動量変化率

10

20

30

40

50

を、前記目標角運動量変化率よりも優先させてそのままにすることを決定するステップと、

前記許容線形運動量変化率と、前記許容角運動量変化率とを実現するために

複数の関節トルクを指示する制御出力情報を生成するステップと、

前記制御出力情報を、複数の関節トルクによって前記人型ロボットを動かす

複数の関節アクチュエータに出力するステップと、を備える

ことを特徴とする請求項 7 に記載の記憶媒体。

【請求項 1 1】

前記第 2 バランス維持ステップは、

前記予測着地位置までの足の踏み出しを実現するために、前記状態情報に基

10

いて、前記人型ロボットの目標線形運動量変化率と目標角運動量変化率とを決定するステップと、

バランス維持のために、前記目標線形運動量変化率、前記目標角運動量変化率、および、前記人型ロボットの物理的制約に基いて、許容線形運動量変化率と、許容角運動量変化率と、を決定するとともに、前記目標角運動量変化率を、前記目標線形運動量変化率よりも優先させてそのままにすることを決定するステップと、

前記許容線形運動量変化率と、前記許容角運動量変化率とを実現するために
に複数の関節トルクを指示する制御出力情報を生成するステップと、

前記制御出力情報を、複数の関節トルクによって前記人型ロボットを動かす
複数の関節アクチュエータに出力するステップと、を備える

20

ことを特徴とする請求項 7 に記載の記憶媒体。

【請求項 1 2】

前記人型ロボットの質量点の中心の軌跡を決定するステップと、

前記予測着地位置までの足の踏み出しを実行する前記人型ロボットの振り足
の軌跡を決定するステップと、をさらに備える

ことを特徴とする請求項 1 1 に記載の記憶媒体。

【請求項 1 3】

外部攪乱に反応して人型ロボットのために非水平地面上の着地位置を決定
する方法であって、前記方法は、

30

前記人型ロボットを、前記人型ロボットの質量中心に対応する点質量と、前
記人型ロボットの第 1 の足に対応する第 1 のスポークと、前記人型ロボットの
第 2 の足に対応する第 2 のスポークと、を有するリムなし車輪モデルとしてモ
デル化するステップと、

前記非水平地面上に射影された前記人型ロボットの質量中心の方向に基
いて、前記リムなし車輪モデルが存在する平面を決定するステップと、

前記人型ロボットの圧力中心に基いて、前記リムなし車輪モデル用のアンカ
ー点を決定するステップと、

力学モデルを適用し、前記アンカー点まわりの前記平面を用いて、前記リム
なし車輪の動きをモデル化するモデル化ステップと、

40

前記モデル化した動きに基いて、足を動かして降ろす先として、第 1 の斜面

を有する前記非水平地面の第 1 区域と、第 2 の斜面を有する前記非水平地面の第 2 区域
と、のいずれかを選択するステップと、

前記モデル化した動きの実行後に前記リムなし車輪モデルの点質量がその上
で静止することになるような前記非水平地面の選択された区域における前記着
地位置を決定する位置決定ステップと、

を備えることを特徴とする方法。

【請求項 1 4】

前記位置決定ステップは、

前記人型ロボットの物理的な制約に基いて、着地位置の可能な範囲を決定す

50

るステップと、
前記可能な範囲内で、前記着地位置を決定するステップと、を備える
ことを特徴とする請求項13に記載の方法。

【請求項15】

前記着地位置までの足の踏み出しを実現するように、前記人型ロボットの足
角度を決定するステップと、
前記着地位置までの足の踏み出しを完了するための時間長を決定するステッ
プと、を備える
ことを特徴とする請求項13に記載の方法。

【請求項16】

前記モデル化ステップは、
倒立振り子として前記人型ロボットをモデル化する第1のモデルを適用し、
振り足を動かしている間、前記人型ロボットが支持足でバランスを保つ足の踏
み出し動作である第1段階をモデル化するステップと、
前記振り足と前記非水平な地面の間での瞬間的な衝突をモデル化する第2の
モデルを適用し、前記振り足が前記非水平な地面に衝突する足の踏み出し動作
である第2段階をモデル化するステップと、を備える
ことを特徴とする請求項13に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、ロボット工学に関し、より具体的には、人型ロボットを制御するバランス制
御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

人間と一緒に働いたり生活したりすることができる現実世界において動作する人型ロボ
ットに関して、「押されること」などの予想外の外部からの攪乱から回復する能力が、非
常に望まれている。ロボットは、バランスを維持する能力がないと、自分自身や、人間ま
たはその周囲の物に対して非常に損害を与えやすい。

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

いくつかの従来の研究では、ロボットがバランス制御を実現できるような制御の枠組み
を提供しようとしているが、これらの従来のモデルは、不正確なことが多く、要求されて
いるレベルを実現できない。さらにまた、従来のバランス制御装置は、十分に人間のよう
である動作でロボットの動作を制御することができない。最後に、従来のバランス制御装
置は、平らな地面に限られていて、非水平や非平坦の地面上でバランス維持を実現するこ
とができない。

【課題を解決するための手段】

【0004】

40

第1の実施形態において、コンピュータ実行型の方法は、人型ロボットを制御し、外部
攪乱に反応してバランスを維持する。ロボット制御装置は、前記人型ロボットの状態情報
を受信する。ロボット制御装置は、前記人型ロボットの状態情報に基いて、前記ロボット
の足の予測着地位置（着地位置：足を動かして降ろす位置）を決定する。予測着地位置は
、前記人型ロボットがその位置にまで足を踏み出せばバランスを維持するような位置を含
む。前記予測着地位置が所定の領域内である場合、ロボット制御装置は、前記外部攪乱に
反応して、前記人型ロボットを、制御して、足の踏み出しを用いずに姿勢を変えさせること
で、バランスを維持する。前記予測着地位置が前記所定の領域外である場合、ロボット
制御装置は、前記外部攪乱に反応して、前記人型ロボットを、制御して、前記予測着地位
置まで足を動かして降ろすことで、バランスを維持する。したがって、ロボットは、外部

50

揺乱に反応して、姿勢を調整するか足の踏み出しを行うかによって、有效地にバランスを維持することができる。

【0005】

第2の実施形態において、コンピュータ実行型の方法は、外部揺乱に反応して人型ロボットのために非水平な地面上の着地位置を決定してバランスを維持する方法である。人型ロボットは、リムなし車輪モデルとしてモデル化される。リムなし車輪モデルは、前記人型ロボットの質量中心に対応する点質量と、前記人型ロボットの第1の足に対応する第1のスパークと、前記人型ロボットの第2の足に対応する第2のスパークと、を有する。前記非水平な地面上に射影された前記人型ロボットの質量中心の方向に基いて、前記リムなし車輪モデルが存在する平面が決定される。前記人型ロボットの圧力中心に基いて、前記リムなし車輪モデル用のアンカー点が決定される。力学モデルが適用され、前記アンカー点まわりの前記平面を用いて、前記リムなし車輪の動きをモデル化する。ロボット制御装置は、前記モデル化した動きに基いて、足を動かして降ろす先として、第1の斜面を有する第1の非水平地面区域と、第2の斜面を有する第2の非水平地面区域と、のいずれかを選択して、そこにまで足を動かす。前記モデル化した動きの実行後に前記リムなし車輪モデルの点質量がその上で静止することになるような前記選択した非水平地面区域における前記着地位置が決定される。

10

【0006】

本明細書に記載された特徴および効果は包括的ではない。具体的には、図面、明細書および特許請求の範囲を考慮すれば、一当業者にとって多くの他の特徴および効果があることは明らかである。さらに、明細書内で用いられている用語は、主に読み易さや教育上の目的のために選択されたのであり、発明特定事項を詳しく説明するために、または制限するためには選択されたわけではない、ということに留意されたい。

20

【図面の簡単な説明】

【0007】

本発明の実施形態の内容は、添付の図面と組み合わせて以下の詳細な説明を考慮することによって容易に理解することができる。

【図1A】本発明の実施形態に係り、前方向に押された後にバランスを維持するためのロボットの姿勢の反応を示す概略図である。

30

【図1B】本発明の実施形態に係り、前方向に押された後にバランスを維持するためのロボットの足の踏み出しの反応を示す概略図である。

【図2】本発明の実施形態に係るロボット制御装置を示す。

【図3】本発明の実施形態に係る人型ロボットを制御する方法を示すフローチャートである。

【図4】本発明の実施形態に係る人型ロボットの2つのスパークのリムなし車輪モデルを示す概略図である。

【図5】本発明の実施形態に係り、歩行を実行している間の人型ロボットのリムなし車輪モデルを示す概略図である。

【図6】本発明の実施形態に係る人型ロボットの着地位置を計算する方法の実施形態を示すフローチャートである。

40

【図7】本発明の実施形態に係る人型ロボットの着地位置を決定するために水平面を示す概略図である。

【図8】本発明の実施形態に係るリムなし車輪モデルの人型ロボットの様々な足の踏み出しの様相を示す概略図である。

【図9A】本発明の実施形態に係る足の踏み出し動作の片足支持場面のための人型ロボットのリムなし車輪モデルを示す概略図である。

【図9B】本発明の実施形態に係る足の踏み出し動作の衝突場面のためのリムなし車輪モデルの人型ロボットを示す概略図である。

【図10】本発明の実施形態に係り、リムなし車輪モデルを使っている人型ロボットのバランス回復境界条件を示す概略図である。

50

【図11A】本発明の実施形態に係る人型ロボットにかかる外部からの力とモーメントを示す自由物体図である。

【図11B】本発明の実施形態に係る人型ロボットの質量中心にかかる等価力とモーメントを示す自由物体図である。

【図12】本発明の実施形態に係る人型ロボットを制御する処理を示すフローチャートである。

【図13】本発明の実施形態に係る人型ロボットの足にかかる力を示す自由物体図である。

【図14】本発明の実施形態に係る人型ロボットの足にかかる力の説明を示す概略図である。

10

【図15】本発明の実施形態に係る足の踏み出し動作に関する軌跡の例を示す概略図である。

【図16A】本発明の実施形態に係り、上り坂の地形上で後ろから押された後にバランスを維持するロボットの反応を示す概略図である。

【図16B】本発明の実施形態に係り、下り坂の地形上で後ろから押された後にバランスを維持するロボットの反応を示す概略図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

以下、本実施形態について複数の図面を参照して説明するが、複数の図面に跨って同様の参照番号が記される場合、それらは同一の又は機能的に類似した構成要素を意味する。同様に、複数の図面に跨って、それぞれの参照番号の最も左の数字は、当該参照番号が最初に使用された図面の番号に対応している。

20

【0009】

本明細書において、“一実施形態”又は“一つの実施形態”と称する場合は、その実施形態に関連して記述される一つの特徴、構造、特性が、少なくとも一つの実施形態に含まれていることを意味する。本明細書の複数箇所に“一つの実施形態では”という語が出現しても、必ずしもすべてが同一の実施形態を指しているわけではない。

【0010】

後記する詳細な説明のいくつかの部分は、アルゴリズム用語や、コンピュータメモリ内のデータビット動作を示す象徴的な表現により、表される。これらのアルゴリズム的な説明や表現は、情報処理分野の当業者が、自らの業績の実体を、同分野の他の当業者に最も効率的に伝えるために用いる手段である。アルゴリズムとは、ここでは、そして一般的にも、ある所望の結果に至る複数のステップ(命令)の首尾一貫したシーケンスのことを指す。ステップとは、物理量に対する物理的操作を要求するステップのことである。通常、必ずしも必要条件ではないが、それらの物理量は、記憶され、送信され、結合され、比較され、かつ、他の操作が可能な、電気的、磁気的又は光学的信号の形を取る。これらの信号のことを、ビット、値、要素、シンボル、文字、語又は数字等と呼ぶことが、主として用語の共通化の理由から便宜である。さらに、物理的操作、物理量の変換、または物理量の表現を要求するステップの配列のうちいくつかのものは、一般性を失うことなく、モジュール又はコードデバイスと呼ぶことが便宜である。

30

【0011】

しかしながら、このような用語の全ては適当な物理量と関連付けられており、これらの物理量に付された単なる便宜的なラベルに過ぎない。特段の説明がない限り、さもなければ後記の説明から明らかであるが、明細書本文全体を通じて、“処理”、“計算”、“算出”、“決定”又は“表示”等の用語を用いた説明は、コンピュータシステムのメモリ、レジスタ又は他の情報ストレージ装置、伝送装置または表示装置の内部で、(電子的な)物理量として表されたデータを操作や変形するコンピュータシステムや同様の電子的コンピューティングデバイス(例えば、専用計算機)の動作や処理のことを指す。

【0012】

本実施形態のいくつかの態様は、アルゴリズムの形になったプロセスステップや命令を

40

50

含む。本実施形態のプロセスステップや命令は、ソフトウエア、ファームウエア又はハードウェア内で実施でき、ソフトウエア内で実施される場合は、ダウンロードして記憶できたり、そして、多様なオペレーティングシステムが用いる別のプラットフォームから操作できたりすることに留意されたい。本実施形態はまた、コンピュータシステム上で実行可能なコンピュータプログラム製品内に導入できる。

【0013】

また、本実施形態は、操作を実行する装置に関する。この装置は、所定の目的を達成する専用装置などであってもよいし、コンピュータ内に記憶されたコンピュータプログラムによって選択的に動作したり、または再構成されたりする汎用コンピュータであってもよい。このようなコンピュータプログラムは、コンピュータが読み取り可能な媒体に記憶され得る。その媒体とは、例えば、コンピュータシステムバスに接続可能な、フロッピーディスク（登録商標）、光ディスク、CD-ROM、電磁光学的ディスク、ROM、RAM、EPROM、EEPROM、電磁的又は光学的カード、ASIC又は電子的命令を記憶し得るあらゆる媒体を含むが、これらに限定されない。メモリまたはストレージは、一時的であってもよいし、非一時的であってもよい。メモリは、情報、データ、プログラムを記憶できる前記した装置および/または他の装置のうち任意の装置を含むことができる。さらに、本明細書で称するコンピュータは、単一のプロセッサを含んでもよいし、コンピュータ能力を増加させるための複数のプロセッサを用いたアーキテクチャであってもよい。

10

【0014】

ここでのアルゴリズムやディスプレイは、もともと任意の特定のコンピュータや他の装置に関係している訳ではない。ここで教示される内容にしたがって、プログラムとともに多様な汎用システムが使用され得る。又は、さらに特化した装置を作成して、方法ステップを実行することも便宜であることがわかっている。これらのさまざまなシステムに必要となる構造は、後記する明細書本文から明らかになる。さらには、本実施形態は、任意の特定のプログラム言語を参照して記述されるものではない。本明細書に記載されている本実施形態の教示を実施するために、多様なプログラム言語が使用され得る。後記において特定の言語に言及した場合、それは本発明の実施可能性及びベストモードを開示すためである。

20

【0015】

さらに、本明細書で使用される用語は、主として意味の取りやすさ及び教示目的から選択されているのであって、発明特定事項を明確にするためや限定するために選択されているのではない。したがって、本実施形態の開示は、特許請求の範囲にて記述されている本実施形態の範囲を例示するものであるが限定するものではない。

30

【0016】

(概要)

ロボット制御装置は、ロボットの動作を制御し、押されたりする外部からの揺乱に反応してバランスを維持する。ロボット制御装置は、ロボットの動作を制御することで、選択的に足の踏み出しを用いるか用いないかのいずれかによって、ロボットのバランスを回復させることができる。図1A-1Bは、ロボットが押されてから立ち直ることができる2つの異なる方法を例示する。図1Aにおいて、ロボット制御装置は、ロボットの線形運動量を完全にそのままにして、（必要であれば）角運動量によって解決を図る。これにより、ロボットが押されたことに対応してその体を回転させるという姿勢バランスの変化を生み、足の踏み出しなしでバランスを維持する。図1Bにおいて、ロボットは、代わって、角運動量をそのままにして、（必要であれば）線形運動量によって解決を図る。これにより、ロボットの足の踏み出し動作を生み、ロボットは、姿勢の変化なしでバランスを維持することができる。異なる状況下で、ロボット制御装置は、どちらのバランス制御技術を使用するか決定し、それにより、外部からの揺乱に応じて人間のようなバランス回復を可能にする。

40

【0017】

(システム構成)

50

図2は、ロボットの動作を制御するロボット制御装置200の実施形態を示すブロック図である。一実施形態において、ロボットは、人間と同様の関節構造（例：各々の足の自由度は6であり、総重量は40～60kg）を有する人型二足歩行ロボットである。ロボット制御装置200は、ロボットの状態情報を受信する。この状態情報は、ロボットの複数の構成の位置や速度に関する検知情報や、ロボットの動き方を示す動作命令（例えば入力制御装置から）を含む。例えば、動作命令によって、ロボットは、じっと静止したり、特定の方向に歩いたり、特定の動作によって手足や胴体を動かしたり回したりする。これらの動作命令は、ロボットにおけるバランス考慮や他の物理的な制約と独立したものでもよい。そのような動作命令は、人間が制御機構を介して入力できるし、または、ロボットの動作の決定を制御する人工知能システムが自動的に生成できる。一実施形態において、状態情報202は、足の動作（例：相対位置や速度）、ロボットの質量中心周りの角運動量、質量中心の位置や速度、関節加速度に関する定められる。場合によっては、状態情報202の動作命令は、ロボットを静止したままにすること（例えば、目標角運動量や目標質量中心速度は理想的には0）を指示できる。

【0018】

ロボット制御装置200は、状態情報202に基いて、ロボットを動かす複数の関節アクチュエータ250を制御する制御出力情報204を生成する。例えば、ロボットは、バランスを維持する間、ロボットの動作命令に対してできるだけ精密に動作を実行するために、体の複数の部分を回転させるか、足を踏み出すことができる。一実施形態において、制御出力情報204は、前記したアクチュエータがロボットの関節の各々に加える複数のトルクを示す複数の関節トルクのベクトルを含む。その動作命令を実行したと仮定した場合に、検知データに基いて、ロボットがバランスを失ってしまうと判定されなければ、その後、制御出力情報204は、関節アクチュエータ250を制御し、受信した動作命令を実行する。一方、ロボット制御装置200が、その動作命令を実行したと仮定した場合に、現在の状態情報202に基いて、ロボットがバランスを失って転倒してしまうと判定すれば、ロボット制御装置200は、まだロボットがバランスを維持できている間は、結果的な動作（“許容動作”）が目標動作に最適に近づくような制御出力情報204を生成する。

【0019】

一実施形態において、ロボット制御装置200は、ロボットを制御して、ロボットが外部からの搅乱（例：押されること）を受けたり、非水平や非平坦の表面上に立っていたり歩行していたりしているときでさえも、ロボットのバランスを維持できる。ロボット制御装置200が、周期的に（例：ミリ秒ごとに）状態情報202を処理し、制御出力情報204を生成することで、ロボットは、動作命令が変わったり、ロボット上に作用する複数の外力が変わったりするときでさえも、継続的に自身のバランスを維持できる。さらに、ロボット制御装置200は、一実施形態において人間動作モデルに基いているので、ロボットの結果的な動作は人間のようである。つまり、ロボットは、人間と同様の方法でバランスを維持するように動作する。

【0020】

一実施形態において、ロボット制御装置200は、プロセッサ220と、メモリ210とを備える。プロセッサ220は、データ信号を処理し、複合命令セットコンピュータ（CISC）アーキテクチャ、縮小命令セットコンピュータ（RISC）アーキテクチャ、複数の命令セットの組み合わせを実行するアーキテクチャ、などのさまざまなコンピューティングアーキテクチャを備えることができる。図2には、単一のプロセッサ220が示されているが、複数のプロセッサが備えられていてもよい。プロセッサ220は、算術論理演算ユニット、マイクロプロセッサ、汎用コンピュータ、またはその他の情報電化製品を備え、メモリ210や複数の外部入力情報からの電子データ信号を送信、受信、および処理する。

【0021】

メモリ210は、コンピュータ実行可能命令やコンピュータ読み取り可能データを記憶

10

20

30

40

50

するコンピュータ読み取り可能記憶媒体を備える。前記した命令は、本明細書に記載されている技術のうち任意のものまたはすべてを実行するためのコードを含む。メモリ210はさらに、ロボット制御装置200に入力されるデータ（例：状態情報202）、ロボット制御装置200が出力するデータ（例：制御出力情報204）、および本明細書に記載されているロボット制御装置200の処理ステップを実行するために用いられる任意の中間データを、一時的にまたは常に（非一時的に）記憶することができる。メモリ210は、ダイナミックランダムアクセスメモリ（DRAM）装置、静态ランダムアクセスメモリ（SRAM）装置、フラッシュRAM（不揮発性記憶装置）、これらの組み合わせ、またはその業界で既知の他の記憶装置であってよい。動作中、プロセッサ220は、コンピュータ実行可能な命令やデータをメモリ210から読み込み、本明細書に記載されている処理ステップを実行する。
10

【0022】

一実施形態において、メモリ210は、高水準制御コントローラ216、姿勢バランス制御コントローラ212およびステップ制御コントローラ214として具現化されたコンピュータ実行可能な命令を格納する。高水準制御コントローラ216は、ロボットの動作が姿勢バランス制御コントローラ212とステップ制御コントローラ214のいずれで制御されるかを決定する。通常、高水準制御コントローラ216は、ロボットがバランスを維持するために足を動かさず、そして動かす必要がないと判定したとき、姿勢バランス制御コントローラ212を制御する。高水準制御コントローラ216は、通常、ロボットが足を動かしているとき、または、ロボットが足を動かすことなくバランスを維持することができないことを示すトリガ状況を検知したとき、ステップ制御コントローラ214を制御する。
20

【0023】

ロボット制御装置200は、本発明の範囲から逸脱することなく、図2に示した構成要素と比較してより多いまたはより少ない構成要素を備えてもよい。例えば、ロボット制御装置200は、他のメモリ、例えば、1次キャッシュ、2次キャッシュ、または1または複数の特定用途向け集積回路（ASIC）を含んでよい。他の実施形態においては、ロボット制御装置200の全体をハードウェアとして実装することができる。

【0024】

図3は、ロボットを制御するためのロボット制御装置200によって実行される高水準プロセスの実施形態を示す。ステップ302で、ロボット制御装置200は、ロボット状態情報（例えば、検知データと現在の動作命令）を受信する。ロボット状態情報は、ロボットの複数の構成要素の位置や速度に関する情報である。ステップ304で、ロボット制御装置200は、ロボットが、現在足を動かしている（または足を動かそうとしている）かどうかを判定する。もし、ロボットが現在足を動かしているならば、ステップ312で、ステップ制御コントローラ214が用いられ、ロボットの動作を決定し、制御する。一方、ロボットが現在すでに足を動かしていないならば、ステップ306で、ロボット制御装置200は、周期的に、ロボットの現在の動的な状態（例えば、その関節の位置や速度）に基いて、総合足配置評価値（G F P E）を算出する。G F P Eは、地表上の点であって、ロボットの足がそこに配置されればロボットがバランスのよい姿勢になるような点を表す。通常、ロボットがバランスをとれているとき、G F P EはすでにロボットのC o M（Center of Mass：質量中心）の下にあり、したがって、ロボットはバランスを保持するためにいかなる動作もする必要がない。しかし、もし、ロボットが不安定になると（例えば、外部からの搅乱に応じて）、G F P EはロボットのC o Mの下から去り、そして、ロボットは、バランスを保持するために、姿勢を変化（例えば、トランクまわりに回転）したり、足を踏み出したりといった、何らかの動作を必要とする。G F P Eの計算は、以下で詳述される。
30

【0025】

ステップ308で、もし、ロボットが、G F P Eは所定の領域内にあると判定すれば、ステップ310で、ロボット制御装置200は、姿勢バランス制御コントローラ212を
40
50

用いてロボットの動作を制御し、それにより、ロボットはバランスを保持し、その動作命令に基いて動作を実行する。一方、ステップ308で、もし、ロボット制御装置200が、G F P Eは所定の領域から外れていると判定すれば、ステップ312で、ロボット制御装置200は、その代わりにステップ制御コントローラ214を用い、ロボットに、算出したG F P E位置まで足を踏み出させる。一実施形態において、前記した所定の領域は、ロボットの支持基盤（例えば、その足）の下の領域から構成される。その後、ステップ314で、ロボット制御装置200は、ロボットの関節アクチュエータを制御し、ステップ制御コントローラ214が姿勢バランス制御コントローラ212のいずれかにより提供された所定の動作を実現する。姿勢バランス制御コントローラ212とステップ制御コントローラ214の動作は、以下で詳述される。

10

【0026】

（G F P E計算）

G F P Eは予測された地表位置から成り、それにより、ロボットは、その予測された地表位置まで足を踏み出して進めば、バランスを維持することができる。G F P Eは、水平な地表上と、非水平な地表上のいずれにも存在できる。一実施形態において、G F P Eの計算は、地面が一定の傾斜を有するか、あるいは、地面がロボットの立っている場所から一つの不連続な傾斜を有する（例えば図9B参照）、と仮定する。さらにまた、ロボットは、地上レイアウト（例えば、斜面変化の傾斜と位置）がわかっている。一つの実施形態において、地上レイアウトは、ロボットの使っている、例えば、そのコンピュータ視覚システムや他のセンサによって、自動的に検出できる。

20

【0027】

一つの実施形態において、ロボット制御装置200は、2本のスパークだけでリムなし車輪から成る人型ロボットの簡略化力学モデルに基いて、G F P Eを算出する。リムなし車輪モデルは、図4に示されている。リムなし車輪モデルは、ロボットの足の各々を表す固定長の質量ゼロのスパーク402、404を備える。リムなし車輪モデルは、また、ロボットのC o Mに対応する車輪の中心に、点質量406を備える。このモデルにおいて、G F P Eは、そのC o Mがその着地位置の上に直接あるときに、リムなし車輪モデルが完全に止まるような地面上の点に、対応する。

【0028】

図5は、ロボットが押されたことに応じてとる姿勢の連続図の例と、それに対応する各々の段階におけるリムなし車輪モデルと、を示す。最初の姿勢502におけるロボットは、後ろから押される。そのロボットは、押されたことに対応して足を動かし、第2の姿勢504になり、そのとき、その動かした足は、算出されたG F P E位置508に着地している。その後、ロボットは、追従する足を動かし、ロボットを垂直直立姿勢506に戻し、そのとき、そのC o MはG F P E508の上に位置する。G F P Eは、非水平な地面上にさえ存在可能である。ロボットが地面の斜面を認識していると仮定すると、足の踏み出し動作が、スパークの固定長や急な斜面のために物理的に不可能でない限り、このG F P Eは、ほとんどの場合存在する。

30

【0029】

図6は、前記したリムなし車輪モデルに基いてG F P Eを算出する処理の実施形態を示す。リムなし車輪モデルは二次元空間内で定義され、そして、ロボットは三次元空間内に存在するので、ステップ602で、高水準制御コントローラ216は、簡略化されたリムなしモデルが存在する平面を決定する。この決定は、図7に示される。通常、ロボット制御装置200は、ロボットが、押された直後に、ロボットC o Mの速度と同じ方向である $\dot{\mathbf{r}}_G$ に動くと予測する。したがって、G F P Eは、地面上で予測された $\dot{\mathbf{r}}_G$ のライン上に位置する。したがって、リムなし車輪用の二次元平面702は、2つのベクトル、 $\dot{\mathbf{r}}_G$ と、C o Mを通る垂直ベクトルによって定義される。ロボットが押された大きさと方向は、G F P Eを計算するために、必ずしもわかつている必要はない。むしろ、一つの実施形態において、選ばれた平面は、単に、押された後のロボットの状態（すなわち、関節の角度と速度）に依存しているだけである。図7において、 \mathbf{P}' はロボットの実際のC o P（Center of Pressure：圧力中心）であり、 \mathbf{P} は車輪が回転する車輪平面に位置する射影C o Pである。黒線で囲まれたドット領域は、ロボットのためのサポート凸包（凸集合体）である。ロボットの2つの足は、図7内では不釣合いに大きく描かれており、凸包と点を明示している。

【0030】

図6に戻り、ステップ604で、アンカ一点は、二次元平面上で決定される。リムなし車輪は、地面に接触し、前記二次元平面について回転する。適切なアンカ一点を決めるることは重要である。なぜなら、ロボットは、リムなし車輪モデルが点接触をする間、足を伸ばすからである。アンカ一点の位置は、G F P E位置や足を踏み出すことの決定に影響を及ぼす。一つの実施形態において、図7で示すように、射影C o Pの \mathbf{P} が、アンカ一点として使われる。ロボットのC o Pの \mathbf{P} は、前記二次元平面に射影される。そして、リムなし車輪が射影C o Pの \mathbf{P} のまわりを回転することで、近似計算される。いくつかの理由により、射影C o Pは、他の可能な選択（C o Mの地面射影）よりも、良いアンカ一点を作成可能である。まず、一つにはその計算が加速度を含むので、C o Pは、押されてからの回復の目的でロボットの状態をよりよく表す。例えば、後ろから押された直後、C o Pは図7のようにC o Mよりも前にある。射影C o Mがアンカ一点として代わりに使われるならば、弱く押されたときでさえ、まったく必要のない大きな足の踏み出しを生み出してしまうことがある。例えば、もし、ロボットが後ろから押され、そして、射影C o Mがアンカ一点として使われると、押されたことは、リムなし車輪のC o Mを垂直方向に作ることがある。これはロボットが前に倒れることを意味し、足の踏み出しが必要になる。これとは対照的に、もし、射影C o Pの \mathbf{P} がアンカ一点として使われて、射影C o Mよりも前にあると、弱く押されたことによる運動エネルギーは、C o Mが回転して射影C o Pの \mathbf{P} を通る垂直線を通過する前に、消失するであろう。これは、ロボットがその弱く押されたことによって前方に倒れないで、足の踏み出しが必要でないことを意味する。

【0031】

(A. 力学的なリムなし車輪モデル)

その後、ステップ606で、力学モデルが、決定した平面とアンカ一点に基いて、リムなし車輪のモデル動作に適用される。リムなし車輪モデルの回転慣性は、アンカ一点 \mathbf{P} の回りのロボットの回転慣性に等しい。図8は、後ろから押されたことをモデル化しているリムなし車輪モデルの動作の4つの段階を示す。図8は地面が水平であるケースを示すが、記述されるモデルは一般的な非水平な地面にも有効である。

【0032】

第一段階802では、C o Mは、アンカ一点の後にあるが、ロボットが十分な運動エネルギーを有しているので、アンカ一点の先まで移動するであろう。第二段階804では、ロボットは足を踏み出す。第三段階806では、ロボットは、C o Mが足の接地点上にある状態で、停止する。第四段階808は、振りスパークが支持スパークの同じ着地位置に

10

20

30

40

50

足を動かす、ロボットの追従の足の動かしをモデル化する。第一段階 802 と第三段階 806 は、倒立振り子モデルとしてモデル化できる。第二段階 804 は、車輪エネルギーが失われる場所での衝突の瞬間的な局面としてモデル化される。これらのモデルは、以下でさらに詳細に説明される。

【0033】

図9Aは、支持足の1本のみが地面と接触している第一段階 802 と第三段階 806 をモデル化している倒立振り子モデルを示す。動作のための方程式は、次の通りである。

$$I_P \ddot{\theta} = mgl \sin \theta \quad (1)$$

10

ここで、 θ は、支持スパイクと垂直線のなす角度である。 I_P は、Pについてのリムなし車輪の回転慣性である。 m は質量である。 g は重力加速度である。 l は、支持足の長さである。振り足が足を動かして下ろすするまで、リムなし車輪の全機械的エネルギー E は、保存される。

【0034】

20

第二段階 804 の接地衝突の直前の時刻 t^- において、 E が保存されることによって、次の関係式が導かれる。

$$\dot{\theta}(t^-) = \pm \sqrt{\frac{2}{I_p} (E - mgl \cos \alpha)} \quad (2)$$

$\theta(t^-) = \alpha$ なので、 α は、2つのスパイク間の角度の半分の角度と定義される足角度である。 $\dot{\theta}(t^-)$ の符号は、初期条件によって決定される。例えば、図9Aの条件では、符号はマイナスである。

30

【0035】

振り足が地面に衝撃を与える第二段階 804 における衝突の間、角運動量 k_P は衝突点のまわりで保存されるものとして推定される。つまり、次の式の通りである。

$$k_P(t^-) = k_P(t^+) \quad (3)$$

40

ここで、 t^+ は、衝突直後の時刻である。衝突によって、角速度の瞬間的な損失が生じる。衝突直後に角速度は、次の式で与えられる。

$$\dot{\theta}(t^+) = \dot{\theta}(t^-) \cos(2\alpha). \quad (4)$$

【0036】

この力学モデルに基いて、次に、G F P E が、非水平な地面について算出される。

【0037】

50

B. 次の斜面上に足を動かして降ろすか否か

図9Bで示すように、もし、地面が不連続な斜面変化をともなって非水平であるならば、ステップ608で、ロボットは、第1斜面または第2斜面の上に足を動かして降ろすべきか否かを判定する。 O が斜面の交点ある場合に定数 $d_1 = P_1O$ と $d_2 = OP_2$ を導入し、 P_1 はアンカーポイントで、 P_2 は第2斜面上の振りスポークの踏み下ろし位置であり、 O を踏むための足角度 α_o は以下の通りに算出される。

10

$$2l \sin \alpha_o = d_1. \quad (5)$$

【0038】

次の2つのいずれかの条件が満たされるならば、ロボットは第2斜面上に足を動かして降ろすはずである。

20

(1) 時刻 t' における足の踏み出しの後、軸足スポークがちょうど第1斜面から離れたときに、 $\theta(t^+) = \alpha - \gamma_1$ がマイナスである。これは、COMがOを通る垂直線をすでに横切ったことを意味する。

(2) Oで踏み出したとき、運動エネルギーは、ロボットが前方に倒れるのに十分大きい。

30

【0039】

第1の条件は全く幾何学的であり、次の式を意味する。

$$\gamma_1 > \alpha_o. \quad (6)$$

【0040】

$\gamma_1 < \alpha_o$ のときは、第 2 の条件をチェックして、ロボットが倒れるのに十分なほど $\theta(0)$ が大きいかどうかを調べる。つまり、第 2 の条件を満たすには、次の式 (7) が 成り立つ。

$$\dot{\theta}(0) > \sqrt{\frac{2mgl}{I_p} \left[\cos(\alpha + \gamma_1) - \cos \theta(0) + \frac{1 - \cos(\alpha - \gamma_1)}{\cos^2(2\alpha)} \right]} \quad (7)$$

10

式の (6) と (7) はともに、ロボットが第 2 斜面上に足を動かして降ろすことの条件 である。

【0041】

地面が水平であるという、より単純な場合では、ロボットは明らかにステップ 608 における判定をする必要がなく、このステップは省略可能である。しかし、上記方程式では、やはり、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ が使われる。

20

【0042】

C. どこに足を動かして降ろすか

次に、ステップ 610 で、ロボットは、どこに足を動かして降ろすべきかを判定する。式の (6) と (7) によって与えられる条件が満たされる非水平な地面において、ロボットは第 2 斜面上に足を動かして降ろす。このケースでは、ロボット制御装置 200 は、足 動かして降ろす動作の終了時に垂直に直立した構成でロボットを停止させる足角度 α を 算出する。

30

【0043】

ロボット制御装置 200 は、まず、最初の配置に与えられた α の幾何学的に可能な範 囲を調べる。この判定は、図 10A-B に示される。図 10A は、第 1 の制限的なケース を表す。ここでは、もし、 r_G から第 2 斜面までの最小距離がスローク長 1 より短いなら ば、ロボット（リムなし車輪モデルに基く）は、 r_G を中心とする半径 1 の円と第 2 斜面 の交点のある図 10A における 2 ポイント、 P_2 と P_3 の間では、物理的に足を踏み出す ことができない。図 10B は、第 2 の制限的なケースを表す。ここでは、推定される最大 足角度である 90 度の α を想定してさえ、ロボットは、急な斜面のために、転倒を免れ ない。ほとんどの場合、これらの限界は存在しないであろう。なぜなら、この 2 つのケー スは、斜面があまりにも急である、あるいは、ロボットがすでにほとんど落ちている、と いった極端な状況を意味するからである。

40

50

【0044】

便宜のため、以下の説明では、図10A-Bで示されるケースを除外する。図9Bで示すように、ロボットが第2斜面上に足を動かして降ろすとき、それぞれの支持スポークと垂直線の間の角度 θ は次の通りである。

$$\begin{aligned}\theta(t^-) &= \alpha - \beta \\ \theta(t^+) &= \alpha + \beta.\end{aligned}\quad (8)$$

10

【0045】

図9BにおけるOから足の着地点 P_2 までの距離は、次のように計算できる。

$$d_2 = -d_1 \cos(\gamma_1 + \gamma_2) + \sqrt{4l^2 \sin^2 \alpha - d_1^2 \sin^2(\gamma_1 + \gamma_2)} \quad (9)$$

【0046】

β は次のように与えられる。

$$\begin{aligned}\cos \beta &= \frac{d_1 \cos \gamma_1 + d_2 \cos \gamma_2}{2l \sin \alpha} \\ \sin \beta &= \frac{-d_1 \sin \gamma_1 + d_2 \sin \gamma_2}{2l \sin \alpha}.\end{aligned}\quad (10)$$

20

【0047】

d_2 と β が α だけの関数であることに注意されたい。

【0048】

足の踏み出しの後、リムなしの車輪は、完全に停止することになっている。図8における第三段階806と第四段階808の間のエネルギー保存の法則によって、 $\dot{\theta}(t^+)$ は、次の通りに得ることができる。

$$\dot{\theta}(t^+) = \pm \sqrt{\frac{2mgl}{I_p} [1 - \cos(\alpha + \beta)]}. \quad (11)$$

30

40

【0049】

式の(4)、(2)、(11)を結合すると、次の方程式が得られる。

$$\cos(2\alpha) \sqrt{\frac{2}{I_p} (E - mgl \cos \alpha)} - \sqrt{\frac{2mgl}{I_p} [1 - \cos(\alpha + \beta)]} = 0. \quad (12)$$

【0050】

この方程式を数値的に解くことで、足角度 α と、対応する、G F P E に関する着地点が得られる。

【 0 0 5 1 】

地面が水平 ($\gamma_1 = \gamma_2 = 0$) という、より単純なケースでは、上記の方程式は、次の、より単純な $\cos \alpha$ に関する 5 次多項方程式を与える。

$$4mgl(\cos \alpha)^5 + 4E(\cos \alpha)^4 - 4mgl(\cos \alpha)^3 - 4E(\cos \alpha)^2 n + 2mgl \cos \alpha + E - mgl = 0, \quad (13)$$

10

【 0 0 5 2 】

人型ロボットの物理的制約は、次の α に関する境界条件を意味する。

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{4}. \quad (14)$$

【 0 0 5 3 】

前記した説明に基いて、G F P E に関する α が α_0 と $\pi/4$ の間に存在することが明らかにされる。これを示すために、方程式 (12) が α において連続であることが見うけられる。 $\alpha = \alpha_0$ のとき、方程式 (7) が成立するので、方程式 (12) の左辺 (複数の項) は厳密にポジティブ (正) である。(なお、 $\alpha = \alpha_0$ のとき $\beta = -\gamma_1$)。 $\alpha = \pi/4$ のとき、方程式 (12) の左辺は厳密にネガティブ (負) である。したがって、方程式 (12) を満たす α が、 α_0 と $\pi/4$ 間に少なくとも一つある。

20

30

【 0 0 5 4 】

最初の揺乱が大きいために足を踏み出した後にロボットが再び倒れるという場合があるかどうかと尋ねる人もいるかもしれない。上記の証明は直観に反するように見えるかもしれない。その理由は、リムなし車輪モデルが $\alpha = \pi/4$ の足の踏み出しの瞬間に完全に止まることである。 $\alpha = \pi/4$ の足の踏み出しの瞬間は、E の大きさに関係なく式

40

(4) 内の角速度がゼロになる。この結果は、非スリップ条件と、非弾性衝突モデルによって得られる。実際には、最初の揺乱が非常に大きければ、ロボットはスリップを経験するかもしれないし、また、非弾性衝突の間の角運動量の保存は現実的でないかもしれない。

【 0 0 5 5 】

さらに、前記した説明に基いて、 α の解が单一であることを示すことができる。これを説明するために、衝突後の総エネルギー $E^+(\alpha)$ は、 α が増えるとともに、単調減少することが示される。解は $E^+(\alpha_1)$ を $= m g l$ を満たさなければならないので、エネルギーについての α は 1 つだけでなければならない。 $\alpha_2 > \alpha_1$ を満たす α_1 と α_2 が与えられれば、 $E^+(\alpha_1)$ と $E^+(\alpha_2)$ は、衝突後の総エネルギーになる。エネルギー差は、次のように計算できる。

$$E^+(\alpha_2) - E^+(\alpha_1) = mgl(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)(1 - \cos^2(2\alpha_2)) \quad (15)$$

ここで、 $\alpha_2 > \alpha$ 、かつ、 $\alpha \in [0, \pi/4]$ のとき、式 (15) は厳密にネガティブ (負) である。非水平な地面へのこの証明の拡張は、解が存在するとき、非常に容易である。

【0056】

D. 足の踏み出しの時間長

反応的な足の踏み出しのような緊急の状況では、足の踏み出しの時間長は、重要なパラメータである。G F P E を使うことによる利点の 1 つは、ロボットが足を踏み出すことができる時間長を推定できることである。なぜなら、ロボットは動いており、足の踏み出し動作にはある程度の時間がかかるからである。これに加えて、また、足の踏み出しの時間長は、ロボット制御装置 200 にとって重要である。もし、足の踏み出しの推定された時間長が、ロボットが物理的に足を踏み出すにはあまりに短すぎるのであれば、ロボット制御装置 200 は、足を踏み出そうとする代わりに、落下防止や落下による損害最小化のような緊急プロトコルに切り替えることができる。ロボットは二次元の倒立振り子としてモデル化されるので、第 1 種不完全橿円積分が足の踏み出しの時間長を得るのに用いられる。

【0057】

E. G F P E の利点

上記したように、G F P E を使って足の着地点を推定することによる利点が、いくつがある。まず、G F P E は予測されるものである。G F P E は、足の踏み出しのための、未来の足の着地点と時間長を与える。これは、状態依存である他の足配置推定法とは対照をなし、したがって、ロボットが足を踏み出しているときまでには移動している推定点を得ることができる。これに加えて、G F P E は、複数の斜面が不連続に変わる間、非水平な地面上に存在する。これとは対照的に、従来の足配置推定法は、水平な地面を前提としていて、非水平な地面に関して足配置予測をすることができない。

【0058】

(一般的なバランス制御)

一般的なバランス制御技術は、ロボットの動作制御に関して、以下で説明する。これらの一般原理は、姿勢バランス制御コントローラ 212 とステップ制御コントローラ 214 の両方に与えて使用可能である。姿勢バランス制御コントローラ 212 において、以下に記述するバランス・パラメータは、ロボットが、角運動量よりも望ましい線形運動量を保とうとして、したがって、姿勢を変化させることによって外部からの搅乱に反応してバランスを維持しようとするように、構成される。ステップ制御コントローラ 214 において、複数のパラメータは、ロボットが、代わりに、G F P E 位置まで足を踏み出すことによって押されたことに反応するように、構成される。ステップ制御コントローラ 214 にお

10

20

30

40

50

いて、したがって、G F P E 位置は、ロボットの動作へのさらなる制約の働きをし、それにより、ロボットは、G F P E 位置へ足を踏み出しながら、そのバランスを維持しようとする。

【 0 0 5 9 】

図11Aは、自由直立人型ロボット1100に作用する外力を説明する自由物体図である。これらは、地面反力($G R F$) f と、地面に垂直な地面反力モーメント τ_n と、ロボット1100の重量 $m g$ とを含む。ここで、 m は、ロボットの全質量であり、 g は、重力加速度である。圧力中心($C o P$)は、点 p に位置する。ダランベールの原理によれば、外部モーメントの和はロボット1100の角運動量の変化率に等しく、外力の和はロボット1100の線形運動量の変化率に等しい。これらの関係は、以下の式(16)および式(17)で表される。

$$\dot{k} = (p - r_G) \times f + \tau_n \quad (16)$$

$$\dot{l} = mg + f \quad (17)$$

【 0 0 6 0 】

上記式において、 r_G はC o M位置であり、 p はC o P位置である。 k および l を合わせたものは、空間重心運動量 $h = [k^T \ l^T]^T$ と呼ばれる 6×1 次元のベクトルとなる。本明細書で使用する場合、空間重心運動量 h はまた、ロボット1100の「空間運動量」または単に「運動量」と呼ぶ。

【 0 0 6 1 】

図11Bには、ロボットのC o M周りの角運動量変化率 \dot{k} と、線形運動量変化率 \dot{l} とがそれぞれ描かれている。(空間)運動量変化率は、 $G R F$ と、 $C o P$ と1対1の関係を有する。式(16)および式(17)からわかるように、図11Aに示されている外力は、図11Bに示されている重心運動量変化率の原因となっているにすぎない。具体的には、 \dot{l} は f によって完全に決定され、その逆も真である。さらに、重心角運動量変化率 \dot{k} は、 $G R F$ および $C o P$ 位置 p の両方によって決定される。逆に言えば、 $C o P$ 位置 p は、 \dot{k} および \dot{l} の両方に依存する。このことは、 p を完全に制御するためには、線形運動量および角運動量の両方を制御する必要があることを示す。

【 0 0 6 2 】

前記した基本的な数学的関係を用いて、ロボット制御装置200は、空間運動量の線形成分および角度成分の両方を制御することによって、ロボット1100のバランスを維持する。具体的には、一実施形態において、ロボット制御装置200の挙動は、目標運動量変化率を用いて定められる。ロボットの足と地面との接触に関するいくつかの制約のために、目標運動量変化率が常に物理的に実現可能となるとは限らないことに留意されたい。

第1に、 $C o P$ は、 $C o P$ がロボットの支持基盤の外側に位置することができない、という制約を受けている。単足支持である(つまり、ロボットの両足が、片足で立つようになして位置している)場合、支持基盤は、地面と接触しているロボットの足の接触領域と同一であるのに対し、水平地面上での両足支持の場合、支持基盤は、ロボットの両足の支持領域の凸包に相当する。

第2に、 $G R F$ は、本来は一方に向かう方向でなければならず、かつ、ロボット1100を地面の方へ引き付けてはならない。

10

20

30

40

50

第3に、G R Fは、ロボットがスリップしないように、ロボットの足と地面との接地面に対する摩擦に関する制約を満たさなければならない。

したがって、ロボット制御装置200は、上記した物理的な制約を満たしている間は、目標値にできるだけ近づける運動量変化率の許容値、または物理的に実現可能な値を決定する。その後、ロボットの全身にある関節を制御して許容運動量変化率を生成する。

【0063】

(それぞれの足のG R FおよびC o Pの決定)

許容運動量を生成するために、ロボットは外力を制御する。図11Aに示す3つの外力のうち、重力 \mathbf{g} は操ることができず、 τ_n の効果は概ね小さい。したがって、G R F¹⁰ f が運動量の制御において実質的に重要であると推測され、G R Fの大きさ、作用線、および作用点(つまり、C o P)は、運動量が決まれば一意に効果が決まる。運動量変化率と、G R F-C o Pの組との間には1対1の対応があるため、目標G R Fおよび目標C o Pは、目標空間運動量変化率から直接的に決定される。

単足支持に関しては、目標G R Fおよび目標C o Pは、支持足にかかる接触力およびその位置を一意に定める。しかしながら、両足支持に関しては、目標運動量変化率を作り出すことができる両足にかかる接触力の組み合わせは無限にある。

【0064】

両足支持期におけるこのような冗長性を解決する方法の一つは、まずG R FおよびC o Pを決定してから、G R FおよびC o Pを足の各々に分配するというものであろう。しかしながら、このようなやり方は、重大な欠点を抱える。

まず、両足が非水平面上および不連続面上に位置している場合、C o Pを定めることができない。G R Fの実現可能性を調べるために、経験的な推測に基いた仮想水平面を定めたり、またはより一般的には、複数の接触点から作り出した三次元凸包を計算したりすればよい。このようなやり方では、足と地面との間の摩擦が両足でそれぞれ異なっている場合に対処することが困難である。

【0065】

このような問題を回避するため、一実施形態において、代替方法として、目標運動量変化率から直接的に足G R Fの各々および足C o Pの各々を計算する。地面と、足の各々との間に面接触があると仮定すると、足G R Fとは、それぞれの足について、一つの足に作用する地面反力であり、足C o Pとは、前記した足G R Fの作用線が、前記した一つの足が形成する足支持面と交差する位置である。前記した足G R Fおよび足C o Pは、より慣用的である正味G R Fおよび正味C o Pとは対照的である。正味G R Fおよび正味C o Pは、両足支持期において両足をまとめて取り扱ったときに適用される値である。

【0066】

足の各々にかかる力の複数のセンサを備えている現代の大型ロボットに関して、足G R Fおよび足C o Pを用いることは、便宜的な選択ということだけでなく、バランス制御にとっての当然の選択ということでもある。足G R Fおよび足C o Pはセンサデータとして直接取得されるが、正味G R Fおよび正味C o Pは後続ステップではじめて計算される。

【0067】

両足支持期における足G R Fおよび足C o Pの非一意性によって、問題解決の他の最適性基準を考慮できる。具体的には、目標運動量変化率を生成するときに、両方の足首トルクを最小化できる。詳細は後記するが、このことは、2つの単純な条件付き線形最小二乗問題を解くことによって実現できる。足首トルクを最小化することは重要である。というのは、足首トルクは概して、足が転倒してはいけないという点において、他のトルクと比べて多くの制約を受けているからである。

【0068】

ロボット制御装置200は、バランス維持のために、ロボットの角運動量および線形運動量の両方を制御する。制御ポリシは、目標運動量に基いて定められ、複数の制御パリエ

ーションを可能にする。複数の異なる状況下で、ロボット制御装置200は、状況に応じて、線形運動量と角運動量を複数の比率で満たすことができる。例えば、同じ一般的な制御原理を使用して、姿勢バランス制御コントローラ212は、線形運動量を保って、角運動量を変化させる。これとは対照的に、ステップ制御コントローラ214は、角運動量を保って、G F P E位置までの足の踏み出しを実行することによって線形運動量を変える。

目標足G R Fおよび目標足C o Pは直接計算できる値であり、ロボット制御装置200が正味G R Fおよび正味C o Pを計算することを必要としない。このように、バランス制御の枠組みは、何ら特別な取り扱いをせずとも、足各々が位置する非水平地面に適用することができる。両足支持に関しては、ロボット制御装置200は、両足の足首トルクを最小化する両足の足G R Fおよび両足の足C o Pを計算する。

10

【0069】

有益なことに、ロボット制御装置200は、単足または両足で支持されているロボットがさまざまな方向に押された場合にバランスを維持できるようする制御信号204を生成する。さらに、ロボットは、両足が別々の移動支持体上にあって異なる勾配と速度を有している場合に、バランスを維持できる。さらに、ロボット制御装置200は、歩行動作用に用いることができる。

【0070】

図12は、ロボット制御装置200が実行する高水準処理を示すフローチャートであり、以下にその処理の詳細を説明する。ステップ1202で、ロボット制御装置200は、

20

状態情報202から、目標角運動量変化率 \dot{k}_d および目標線形運動量変化率 \dot{l}_d （本明細書では、「目標運動量変化率」と総称する）を決定する。ステップ制御コントローラの場合において、目標線形運動量変化率 \dot{l}_d は、ロボットが、算出されたG F P E位置まで足を踏み出すことができる線形運動量変化率 \dot{l}_d を含んでもよい。

【0071】

続いて、ステップ1204で、ロボット制御装置200は、目標運動量変化率から両足の許容足地面反力（G R F）および両足の許容足圧力中心（C o P）を決定する。許容足G R Fおよび許容足C o Pは、バランスに関する複数の制約（例：許容C o Pが支持基盤の下方の領域に制限されていること、あるいは、ロボットが転倒すること）に基いて制限を受けている。したがって、もし、ロボットが依然としてバランスを維持している間に目標運動量変化率を作り出すことが物理的にできない場合、許容足G R Fおよび許容足C o Pが決まっても、そのまま目標運動量変化率が得られるわけではできない。その代わり、許容足G R Fおよび許容足C o Pが決まれば、課せられた制約下で目標運動量変化率に最適に近づけた許容運動量変化率が得られる。

30

ステップ1206で、許容運動量変化率は、許容足G R Fおよび許容足C o Pから決定される。

ステップ1208で、ロボット制御装置200は、複数の関節および両足の目標動作に基いて許容運動量変化率を実現する複数の関節加速度を決定する。

40

その後、ロボット制御装置200は、関節加速度および許容足G R Fを実現する複数の関節トルクを決定する。

その後、ステップ1210で、ロボット制御装置200は、複数の関節加速度と許容足G R Fを実現する複数の関節トルクを決定する。

上記した処理ステップの各々については、以下でさらに詳述する。

【0072】

(A. 制御構組み)

人型ロボットの配置は、 $Q = (T_0, \theta) \in \text{SE}(3) \times \mathbb{R}^n$ で表すことができる。ここで、 $T_0 = (R_0, p_0) \in \text{SO}(3) \times \mathbb{R}^3$ は、基本フレーム（胴体）の位置であり、 n は、関節の自由度（D o F : Degree of Freedom）の総数を表す。下付き表記の 0 および s はそれぞれ、基本フレームおよび複数の関節を表している。 s は、幾何学的力学において複数の関節角度で表される“形状（shape）”を意味する。したがって、ロボットの全自由度は、 $6 + n$ である。なぜならば、浮遊基盤の自由度が 6 だからである。10

一般化速度は、 $\dot{q} = (v_0, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{6+n}$ と表現することができる。ここで、 $v_0 = (\omega_0, v_0)$ は、身体フレームに対する胴体の空間速度であり、次の式のように表される。20

$$[\omega_0] = R_0^T \dot{R}_0 \quad (18)$$

$$v_0 = R_0^T \dot{p}_0 \quad (19)$$

【0073】

それから、地面との接触している場合の制約方程式、および、ロボットの動作の関節空間方程式は以下のようになる。

$$\mathbf{0} = \mathbf{J}(Q)\dot{q} \quad (20)$$

$$\tau = \mathbf{H}(Q)\ddot{q} + \mathbf{c}(Q, \dot{q}) + \tau_g(Q) - \mathbf{J}^T \mathbf{f}_c \quad (21) \quad 30$$

ここで、 $\tau \in \mathbb{R}^{6+n}$ は一般化力を表す。 \mathbf{H} は関節空間慣性行列である。 \mathbf{c} はコリオリ力、遠心力、減衰力を含む。 τ_g は重力トルクである。 \mathbf{f}_c は地面からの外部“制約”力を表すベクトルであり、両足の足 G R F および足 C o P によって決定される。ヤコビ行列 \mathbf{J} は、 \mathbf{f}_c を一般化力に変換する。 \mathbf{f}_c の次元は、足と地面との接触する箇所における制約の性質に依存する。例えば、単足支持に関しては、 \mathbf{f}_c の次元は 6×1 （力について三次元、そしてトルクについて三次元）であるのに対し、両足支持に関しては、足と地面との間で非滑性面接触が維持されている場合には、 \mathbf{f}_c の次元は 12×1 である。40

【0074】

ロボットの基盤は自由浮遊しているので、 τ の最初の6つの要素は0であり、つまり $\tau^T = [0^T \ \tau_s^T]$ である。したがって、式(20)は、2つの部分に分けることができる。1つは、前記した基盤に対応しており、下付き数字0によって表される。もう一つは、前記した複数の関節に対応しており、下付き記号 s によって表される。このとき、式(21)および式(22)は、次のようなになる。

$$\mathbf{0} = \mathbf{J} \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{J}} \dot{\mathbf{q}} \quad (22)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{H}_0 \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_0 + \tau_{g,0} - \mathbf{J}_0^T \mathbf{f}_c \quad (23)$$

$$\tau_s = \mathbf{H}_s \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}_s + \tau_{g,s} - \mathbf{J}_s^T \mathbf{f}_c \quad (24)$$

ここで、式(22)は、式(20)の微分式である。上記した構組みを考慮して、姿勢バランス制御コントローラ212は、制御トルク τ_s を決定することで、ロボットの力学を制御し、バランスを維持する。

【0075】

人型ロボットの自由度が大きいため、バランス制御コントローラ212の一実施形態は、最適化問題を解く。しかしながら、探索空間の次元が増大するにつれ、最適化の計算コストは急激に増大する。最小二乗問題のような最も単純な最適化問題でさえ、 $O(n^3)$ のオーダの時間的コストを有する。したがって、計算効率を改善するために、逐次的方法を用いることができる。この方法では、バランス制御の問題を、逐次的に解くことができる、より小さな従属的問題に分割できる。さらに、最初に \mathbf{f}_c および $\ddot{\mathbf{q}}$ を計算することによって、逆動力学用の効率の良い線形時間アルゴリズムを用いることができ、2次式の時間的コストを有する式(21)のロボットの動作の関節空間方程式を計算する必要がない。

【0076】

10

20

30

(B : バランス制御コントローラの目標運動量)

状態情報202を受信した後、ステップ1202で、ロボット制御装置200は、目標角運動量変化率 \dot{k}_d および目標線形運動量変化率 \dot{l}_d を決定する。代替的なさまざまな実施形態において、目標回転挙動は、角運動量の代わりにC o Pを用いて定めることができる。G R F - C o Pの組は、2つの運動量変化率と1対1の関係にあるが、バランスに関するそれらの意義はまったく異なる。

G R FおよびC o Pが外力の大きさ、方向および作用点を特徴付けるのに対し、2つの運動量変化率は、結果的なロボットの動作を表現する。ロボットと地面とが接触することで発生するG R Fの方向が片側であるという性質と、前記接触に伴う摩擦による制限とは、G R FおよびC o Pのとりうる範囲に関して直接的な制約を課している。前記した性質および制限は、運動量変化率の実現可能な範囲に影響を及ぼすが、間接的でしかない。

一方、運動量を用いてロボットの集合的な動作を説明することは、より当然のことである。したがって、前記した実施形態において、制御装置200は、運動量を制御目的として用い、G R FおよびC o Pを制約として用いる。外部搅乱に対するロボットの全体的な挙動は、目標運動量変化率によって決まる。一実施形態において、ロボット制御装置200は、以下のフィードバック制御ポリシを用いる。

$$\dot{k}_d = \Gamma_{11}(k_d - k) \quad (25)$$

$$\dot{l}_d/m = \Gamma_{21}(\dot{r}_{G,d} - \dot{r}_G) + \Gamma_{22}(r_{G,d} - r_G) \quad (26)$$

ここで、 \dot{k}_d および \dot{l}_d はそれぞれ、目標重心角運動量変化率および目標重心線形運動量変化率である。 m はロボットの質量である。 $r_{G,d}$ は目標C o M位置である。 k はロボットの実角運動量である。 r_G はロボットの実C o M位置である。 \dot{r}_G はロボットの実C o M速度である。 $\Gamma_{i,j}$ は、実験的に決定できるフィードバック利得パラメータの 3×3 対角行列を表す。

【 0 0 7 7 】

フィードバック・パラメータ $\Gamma_{i,j}$ は、姿勢バランス制御コントローラ 212 とステップ制御コントローラ 214 のいずれで制御するのかで変わり、押されたことからの複数の異なる回復運動を実現する。例えば、前記した一般的な構組みにおいて、小さな値である

Γ_{11} と大きな値である Γ_{21} 、 Γ_{22} は、後ろから押された後、図 1 A に示される動作を引き起こす。この場合、姿勢バランス制御コントローラ 212 は、角運動量の優先度がより高く、線形運動量をそのままにしようとする。通常、目標角運動量は、ゼロにセットされ、ロボットを直立に保つ。そして、曲げ動作は、 $\dot{\mathbf{k}}$ 内で誤差を与える角運動量を生み

10 出す。しかし、発生した角運動量は COM を後ろに引くのを補助し、そして、小さな Γ_1

によって制御コントローラは角運動量誤差をほとんど無視できる。例えば、1 つの実施

形態において、姿勢バランス制御コントローラ 212 は、ゲイン $\Gamma_{11} = \text{diag}\{5, 5, 5\}$ 、 $\Gamma_{21} = \text{diag}\{40, 20, 40\}$ 、 $\Gamma_{22} = \text{diag}\{8, 3, 8\}$ を使う。

【0078】

他方、ステップ制御コントローラ 214 は、ロボットがより厳密に角運動量をそのままにする要因になる大きな Γ_{11} を適用する。目標角運動量がゼロであるとき、それは足の踏み出し動作にとっては合理的であるが、制御コントローラは、上体を曲げるのではなく

、ロボット COM 位置を動かす。ロボットは、 $\dot{\mathbf{l}}$ に関する誤差を生み出す G F P E 位置の方へ足を踏み出すことによって、線形運動量を発生させる。しかし、その誤差は、小さな Γ_{21} と Γ_{22} のために、縮小される。そして、ロボット制御装置 200 は、目標線形運動量よりも目標角運動量を優先させる。ある実施形態において、ステップ制御コントローラ 214 は、ゲイン $\Gamma_{11} = \text{diag}\{20, 20, 20\}$ 、 $\Gamma_{21} = \text{diag}\{2, 2, 5\}$ 、 $\Gamma_{22} = \text{diag}\{3, 3, 8\}$ を使う。

【0079】

式 (26) にある線形位置フィードバック項とは異なり、式 (25) には、角度位置フィードバック項がないことがわかる。これは、物理的には意味のある角度 “位置” を、角運動量に対応するように定義できないからである。姿勢バランス維持の実験 (つまり、目標線形運動量および目標角運動量が 0 であり、ロボットが静止したまま立っていることが望まれる) に関しては、 \mathbf{k}_d および $\dot{\mathbf{r}}_{G,d}$ は 0 に設定し、 $\mathbf{r}_{G,d}$ は 2 つの足の幾何学的中心の中点に設定する。他の、ロボットが動作中である場合に関しては、状態情報 202 は、

0 以外の値をとる \mathbf{k}_d および $\dot{\mathbf{r}}_{G,d}$ を含む。

【0080】

さまざまなセンサを用いて k 、 r_G 、および \dot{r}_G を直接測定することができ、または、制御装置 200 は、 k 、 r_G 、および \dot{r}_G を、他の測定可能な量および既知のロボットパラメータ（例：質量およびリンク（節）各々の位置）から導き出すことができる。例えば、一実施形態において、ロボットの関節の各々は、関節位置データ（例：関節角）を制御装置 200 に与える位置符号器を備える。制御装置 200 は、関節位置データを時間微分して、関節速度（例：角速度）を取得できる。

また、ロボットの胴体は、内部のジャイロスコープおよび加速度計を備えることができる。ジャイロスコープは胴体角速度を測定し、制御装置 200 は、前記した胴体角速度を積分して胴体角度位置を取得できる。加速度計は、胴体線形加速度を生成し、制御装置 200 は、前記した胴体線形加速度を積分して胴体線形速度を取得でき、もう一回積分して胴体線形位置を取得できる。制御装置 200 は、1 または複数のさまざまな種類の検出データから k 、 r_G 、および \dot{r}_G を計算できる。

代替的な実施形態においては、複数種類のセンサを用いて測定される前記した量を導き出すことができる。例えば、一実施形態において、ロボットは、自身に加わる力を直接測定できる力検出表皮を備えることができ、前記測定した力を用いて k 、 r_G 、および \dot{r}_G を決定できる。

【0081】

一実施形態において、ロボットは、また、足の各々の中に力検出部を備える。力検出部の各々は、G R F を測定する。前記した G R F は、直線力の 3 成分と、トルクの 3 成分を含む。代替的に、制御装置 200 は、観測された力学によって G R F を間接的に計算できる。

【0082】

(C. 許容足 G R F、許容足 C o P、および、許容運動量変化率)

目標運動量変化率 \dot{k}_d および \dot{i}_d を得ると、ステップ 1204 で、ロボット制御装置 200 は、結果的な運動量変化率（つまり、許容運動量変化率）が目標値にできるだけ近くなるように許容足 G R F および許容足 C o P を決定する。目標運動量変化率は、許容できない場合がある。なぜなら、例えば、目標運動量変化率がロボットの支持基盤の外側に位置してしまう目標 C o P、 p_d を要求してしまい、したがって、目標運動量変化率を満たそうとする試みがロボットの転倒を招くことがあるからである。

さらに、G R F は、本来は一方に向かう方向でなければならず、かつ、ロボットを地面の方へ引き付けてはならない。さらに、ロボットは、（例えば、もし、目標運動量変化率 \dot{k}_d および \dot{i}_d が、アクチュエータに対して、そのアクチュエータが発生できるよりも大きなトルクを発生するように要求したり、または一つの肢がその肢の物理的範囲を超える動作を行うように要求されたりする場合には）、ロボットの物理的能力を超える目標運動量変化率 \dot{k}_d および \dot{i}_d を実現することができない。

したがって、ロボットは、ロボットの許容 C o P および許容 G R F によって制約され、今度は前記した許容 C o P および許容 G R F が、目標運動量変化率を許容運動量変化率に制限する。ロボット制御装置 200 は、目標運動量変化率にできるだけ近づけた許容運動量変化率を作り出す最適な足 G R F および足 C o P を決定する。

【0083】

10

20

30

40

50

1) 線形運動量および角運動量の間の優先順位

もし、目標足G R Fおよび目標足C o Pが許容できないものである場合、目標運動量変化率を生成し、バランスを維持したままにすることは、物理的に不可能である。このよう

な場合、ロボット制御装置200は妥協して、 \dot{k} および \dot{l} のうちどちらの量を保存するのがより重要であるかを決定する。姿勢バランス制御コントローラ212が使用されると、目標C o P位置 p_d は、支持基盤の最も近い点に線形移動し、その結果、許容C o P位

置 p になる。目標G R F f_d の大きさと作用線は変化せず、その結果、許容G R F f と 10
なる。このような場合、状態情報202の線形運動量に対する目的は満たされる（つまり、C o Mは静止したままである）が、状態情報202の角運動量に対する目的は、いくぶん妥協している。もし、角運動量について妥協しないならば、目標C o P位置 p_d は支持基盤の外側に位置しているのでロボットは転倒してしまう。この解決方法から生じる挙動は、胴体の回転によって特徴付けられる（例えば図1A参照）。このような方策は人間ににおいて観測されるものであり、胴体を押された方向に折り曲げて、バランスを維持する。

【0084】

対照的に、ステップ制御コントローラ214が使用されると、目標C o P、 p_d を支持 20
基盤のほうに線形移動させて許容C o P、 p にするだけでなく、目標G R F f_d の方向
を回転させて、許容G R F f にことができる。この解決方法においては、角運動量
に対する目的は満たされる（つまり、ロボットは、胴体を回転させない）。そして、線形
運動量が制御され、G F P E位置までの足の踏み出しが実現される。この場合、ロボット
は、残留線形運動量に起因する外力の方向に沿って直線的に動き、足を踏み出すことによ
つて転倒を防止する（例えば図1B参照）。

【0085】

2) 単足支持の場合

单足支持の場合を取り扱うことは容易である。なぜならば、足G R Fおよび足C o Pは
、式(16)および式(17)から以下に示すようにして目標運動量変化率から一義的に
決定されるからである。

$$f_d = \dot{l}_d - mg \quad (27)$$

【0086】

ここで、Y軸は、重力ベクトルの方向、例えば $g = (0, g, 0)$ に平行である。

もし、上記で計算した f_d および p_d が有効であれば、これらの2つの値は直接計算される。そうでなければ、すでに説明したとおり、制御コントローラは、線形運動量を優先する。もし、 f_d が摩擦円錐の外側にあるときは、まず f_d を摩擦円錐上に射影して足の滑りを防止する。

【0087】

3) 両足支持の場合

両足支持に対する両足の足G R Fおよび両足の足C o Pを決定することは、より複雑である。式(16)および式(17)は、両足支持の場合に合わせて書き直すことができる。ここで、足各々におけるG R Fは、対応する足首にかかる力およびトルクの項で表現される。この概念を説明する自由物体図を図13に示す。足首に位置する足の局所フレームに対して、足各々にかかるG R Fを表現することによって、左右の足G R F \mathbf{f}_r および \mathbf{f}_l によって足首にかかる左右のモーメント $\boldsymbol{\tau}_r$, $\boldsymbol{\tau}_l$ を取り除くことができる。このように表現すると、両足首にかかるトルクを陽関数で表現できるという利点がある。

10

$$\dot{\mathbf{k}} = \dot{\mathbf{k}}_f + \dot{\mathbf{k}}_\tau \quad (30)$$

$$\dot{\mathbf{k}}_f = (\mathbf{r}_r - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{f}_r + (\mathbf{r}_l - \mathbf{r}_G) \times \mathbf{f}_l \quad (31)$$

$$\dot{\mathbf{k}}_\tau = \boldsymbol{\tau}_r + \boldsymbol{\tau}_l \quad (32)$$

$$\dot{\mathbf{l}} = m\mathbf{g} + \mathbf{f}_r + \mathbf{f}_l \quad (33)$$

20

【0088】

式(30)において、 $\dot{\mathbf{k}}$ は、足首にかかる力に起因する $\dot{\mathbf{k}}_f$ と、足首にかかるトルクに起因する $\dot{\mathbf{k}}_\tau$ との2つの項に分けられる。したがって、左右の足首トルクは、左右の足G R Fを決定する際に考慮される。 \mathbf{f}_r および \mathbf{f}_l はそれぞれ、右足および左足におけるG R Fであり、 \mathbf{r}_r , \mathbf{r}_l は、身体フレームのうち足の箇所に対応する位置であって、左右の足首関節の各々に位置している。左右の足首トルク $\boldsymbol{\tau}_i$, ($i = r, l$) は、以下のように、足G R Fおよび足C o Pの項で表現される。

30

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{R}_i(\mathbf{d}_i \times \mathbf{f}_i + \boldsymbol{\tau}_{n,i}) \quad (34)$$

ここで、 \mathbf{R}_i は、足の向きである。 \mathbf{d}_i は、身体フレーム内部にある足C o Pである。 $\boldsymbol{\tau}_{n,i} = (0, 0, \tau_{n,i})$ は、身体フレーム内部にある垂直トルクである。

40

【0089】

前記した説明を示す図を図14に示す。地面から右足への圧力は、右足フレーム {R} 内部にある d_r として表される C o P と、垂直モーメント τ_v, r と、 G R F f_r を用いて表現される。 f_r は、地面の摩擦円錐を近似する4つの基底ベクトル β_{rj} ($j = 1 \cdots 4$) を用いて表されており、つまり、 $f_r = \sum_j \beta_{rj} \rho_{rj}$ である。ここで、 $\rho_{rj} (\geq 0)$ は、 β_{rj} の方向における大きさである。したがって、地面圧力は、7つのパラメータ $\{\rho_{r1}, \dots, \rho_{r4}, \ddot{d}_{rx}, d_{ry}, m_{v,r}\}$ によって定まる。このような表現は、最小限の表現（力について3つ、トルクについて3つ）よりもほんの1つだけ多いパラメータを有しているため小さくまとまっており、足裏の矩形凸包に対する制約は、非常に単純な形式で表現できる。つまり、 $\rho_j \geq 0$ 、 $\underline{d}_j \leq d_j \leq \bar{d}_j$ 、および、 $|\tau_n| < \mu f_{r,Z}$ である。ここで μ は摩擦係数である。 h は、足裏から始まる足フレームの高さである。

10

20

【0090】

\dot{k} および \dot{l} が与えられたとしても、両足の G R F および両足の C o P の解を求めることは、劣決定問題である。したがって、さらなる最適性基準を定めて解を見つけることになる。最小限の左右の足首トルクを最適条件に組み込むことによって、目的関数は、以下のように表現される。

$$w_l \|\dot{l}_d - \dot{l}(f_r, f_l)\|^2 + w_k \|\dot{k}_d - \dot{k}(f_r, f_l, \tau_r, \tau_l)\|^2 + w_f (\|f_r\|^2 + \|f_l\|^2) + w_\tau (\|\tau_r\|^2 + \|\tau_l\|^2) \quad (35)$$

ただし、 f_i と τ_i とは許容

30

ここで、最初の2つの項は、目標運動量変化率を実現することを目的としている。3番目の項は、左右の足 G R F を正規化している。最後の項は、左右の足首トルクを最小化しようとするものである。複数の w は、複数の異なる目的間の重み付け係数である。

【0091】

式(34)の f_i および d_i の外積によって、式(35)を最小化することは、非線形問題である。計算効率を高めるための一つの解決方法は、前記した一般非線形最適化問題を、最小二乗法または二次計画法を用いて解を求めることができる、より容易な複数の問題に変換することである。このような解決方法は、サンプルとなる接触点における力を用いている足 G R F および足 C o P を表現することによって実現できる。しかしながら、このような手法には、探索空間の次元が著しく増大してしまうというトレードオフがある。例えば、一実施形態における一解決方法においては、その解決方法によって表現されることになる G R F および C o P は、16個の変数を用いて形作ることで、一つの足の G R F および C o P を形作ることができるが、これにより、未知の要素の次元よりも10多い変数となってしまう。

40

【0092】

代替的に、探索空間を大きくして最適化問題をより容易にする代わりに、式(35)を、両足の足G R Fを決定するためと、両足のC o Pを決定するためとの、2つの条件付き最小二乗問題を用いて近似することができる。このような方法は、変数の数を少ないままにする。さらに、左右の足首トルクを最小化できる。左右の足首トルクを最小化することは重要である。なぜならば、前記した足首トルクは、地面との接触が片側だけで行われるという性質のために他の関節トルクよりも大幅に制限されるからである。

左右の足首トルクを最小化するために($\dot{\mathbf{k}}_r \rightarrow \mathbf{0}$)、左右の足G R F \mathbf{f}_r および \mathbf{f}_l は、 $\dot{\mathbf{l}}_d$ を満たす間は、($\dot{\mathbf{k}}_f \rightarrow \dot{\mathbf{k}}_d$)のように、つまり目標角運動量変化率にできるだけ近づけるようにして、 $\dot{\mathbf{k}}_f$ を生成すべきである。もし、 $\dot{\mathbf{k}}_f = \dot{\mathbf{k}}_d$ であれば、両足首トルクは0になる。もし、 $\dot{\mathbf{k}}_f \neq \dot{\mathbf{k}}_d$ であれば、両足首トルクは、残留角運動量変化率 $\dot{\mathbf{k}}_d - \dot{\mathbf{k}}_f$ を構成するように決定される。

【0093】

a) 左右の足G R Fの決定

下記式の最適化問題に対する解は、左右の足G R F \mathbf{f}_r および \mathbf{f}_l を求める。

$$\min \|\dot{\mathbf{l}}_d - \dot{\mathbf{l}}(\mathbf{f}_r, \mathbf{f}_l)\|^2 + w \|\dot{\mathbf{k}}_d - \dot{\mathbf{k}}_f(\mathbf{f}_r, \mathbf{f}_l)\|^2 + \epsilon (\|\mathbf{f}_r\|^2 + \|\mathbf{f}_l\|^2) \quad (36)$$

【0094】

ここで、 w と ϵ ($w \gg \epsilon > 0$) は、それぞれ、実験的に決定できる角運動量および左右の足G R Fの大きさの各々に対する重み付け係数である。例えば、一実施形態において、 $w = 0.1$ であり、 $D \int = 0.01$ である。 $\dot{\mathbf{k}}_d = \dot{\mathbf{k}}_f$ であれば、両足首トルク \mathbf{T}_i は0になることに留意されたい。足G R Fの各々は、地面上の摩擦円錐(図14では逆ピラミッド型)に近似する4つの基底ベクトル β_{ij} およびそれらの大きさ ρ_{ij} を用いて形作られる。

$$\mathbf{f}_i = \sum_{j=1}^4 \beta_{ij} \rho_{ij} := \beta_i \rho_i \quad (37)$$

ここで、 $\beta_i = [\beta_{i1} \ \cdots \ \beta_{i4}]$ である。

【0095】

\mathbf{r}_r および \mathbf{r}_l は、ロボットの配置によって決定され、これらは、前記した問題の解を求める場合の一定値となることに留意されたい。したがって、式 (37) を式 (31) に代入すると、 $\dot{\mathbf{k}}_f$ は、 ρ_i の線形方程式になる。行列方程式に再配置すると、式 (36) の最適化問題は、未知の要素が ρ_i だけとなる非負の制約を伴う線形最小二乗問題に置き換わる。

$$\min ||\Phi \rho - \xi||^2 \text{ s.t. } \rho_i \geq 0 \quad (38) \quad 10$$

ここで、

$$\Phi = \begin{bmatrix} \beta_r & \beta_l \\ w\delta_r & w\delta_l \\ \epsilon \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \xi = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{l}}_d - mg \\ w\dot{\mathbf{k}}_d \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\rho = [\rho_r^T \quad \rho_l^T] \quad (40) \quad 20$$

$$\delta_i = [\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_G] \beta_i \quad (41)$$

である。

【0096】

式 (38) は、非負最小二乗アルゴリズムを用いて解を求めることができる。非負最小二乗アルゴリズムは、パラメータ調整を必要としない利点がある。

【0097】

b) 左右の足C o Pの決定

一般的に、目標角運動量変化率は、 \mathbf{f}_r および \mathbf{f}_l によるだけでは生成することはできないので、左右の足首トルクによって、残留角運動量変化率 $\dot{\mathbf{k}}_{\tau,d} = \dot{\mathbf{k}}_d - \dot{\mathbf{k}}_f$ を生成すべきである。このような目的を実現するために、足の各々の局所C o Pは、足首トルクの各々を最小にしている間は、左右の足首トルクが、 $\dot{\mathbf{k}}_{\tau,d}$ を作り出すように決定される。 \mathbf{f}_i を固定した後、式(19)は、 \mathbf{d}_i および $\boldsymbol{\tau}_{n,i}$ の線形関数として以下のように書き換えることができることに留意されたい。

$$\boldsymbol{\tau}_i = [-\mathbf{f}_i] \mathbf{R}_i \mathbf{d}_i + \mathbf{R}_i \boldsymbol{\tau}_{n,i} \quad (42)$$

その結果、最適化問題は、以下のように上限および下限を有する最小二乗問題として表現できる。

$$\min ||\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\kappa}||^2 \text{ s.t. } \underline{\boldsymbol{\eta}} \leq \boldsymbol{\eta} \leq \bar{\boldsymbol{\eta}} \quad (43)$$

ここで、

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Psi}_k \\ \epsilon \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{k}}_{\tau,d} \\ \epsilon \boldsymbol{\eta}_d \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [d_{r,X} \ d_{r,Y} \ \tau_{n,r} \ d_{l,X} \ d_{l,Y} \ \tau_{n,l}]^T \quad (45)$$

であり、定数行列 $\boldsymbol{\Psi}_k \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ の複数の要素は、式(42)から決定される。

$\underline{\boldsymbol{\eta}}$ と $\bar{\boldsymbol{\eta}}$ は、図5に示すような足の位置、摩擦係数および足G R Fの法線成分から決定される。 $\boldsymbol{\eta}_d$ は、 $\boldsymbol{\tau}_i$ が0となるように、つまり、 \mathbf{f}_i の作用線が足首と交差するように選択される。式(43)は、例えば、レーベンバーグ・マルカート法、または他の既知の方法などの適切な方法を用いて解くことができる。前記した最小二乗問題は両方とも、変数の数が少ないので、最適化を迅速に実現できることに留意されたい。

【0098】

4) 許容運動量変化率

許容足G R Fおよび許容足C o Pを決定した後、許容運動量変化率 $\dot{\mathbf{h}}_a$ は、また、式(16)および式(17)を用いて、または両足支持に対しては式(30)および式(33)を用いて計算される。

【0099】

(D. 関節加速度および関節トルクの決定)

両足の許容足G R F、許容足C o Pおよび許容運動量変化率を決定した後、ステップ1208で、ロボット制御装置200は、前記した許容運動量変化率および足の接触による制約を生成する複数の関節加速度を決定する。

10

20

30

40

50

【 0 1 0 0 】

はじめに、すべての目標関節加速度 $\ddot{\mathbf{q}}$ は、それらが式 (22) と、式 (23) の変分とを満たすようなバランスを実現するように決定される。空間重心運動量 $\mathbf{h} = [\mathbf{k}^T \, \mathbf{l}^T]^T$ は、一般化速度の項で表すことができる。

$$h = A(Q)\dot{q} \quad (4.6)$$

ここで、 $A \in \mathbb{R}^{6 \times (6+n)}$ は、一般化速度を空間運動量に対して線形写像する重心運動量行列である。式 (4.6) を微分すると以下のようなになる。

$$\dot{h} = A\ddot{q} + \dot{A}\dot{q} \quad (4.7)$$

【 0 1 0 1 】

ニュートンの法則（式（16）および式（17）参照）を用いて、 \dot{h} を外力に置き換えると、前記した外力に起因する力学系の集合動作が表現され、式（23）が表すものと同様となる（なお、関節トルクは、式（23）に含まれていないことに留意されたい）。唯一の相違点は、参照するフレームである式（47）が、C o Mにおけるフレームに関して表現されているのに対し、式（8）が、基本フレームに関して書かれていることである。

【 0 1 0 2 】

この実施形態では式(47)が用いられる。なぜならば、バランス制御コントローラは、重心運動量を用いてバランス制御コントローラ自身の目的を定めるからである。具体的には、ロボット制御装置200は、以下の目的関数を最小にするような複数の出力加速度 $\ddot{\theta}_a$ を計算する。

$$w\|\dot{\boldsymbol{h}}_a - \boldsymbol{A}\ddot{\boldsymbol{q}} - \dot{\boldsymbol{A}}\dot{\boldsymbol{q}}\| + (1-w)\|\ddot{\boldsymbol{\theta}}_d - \ddot{\boldsymbol{\theta}}\| \quad (4.8)$$

$$\text{s.t. } J\ddot{q} + \dot{J}q = a_d$$

[0 1 0 3]

ここで、 \dot{h}_a は、許容運動量変化率である。 $\ddot{\theta}_d$ は、目標関節加速度を明示する。目標関節加速度は、上体の目標動作を表現することができる。パラメータ W は、バランス対象（第 1 の項）と、運動学的仕事と関連する所定の動作対象（第 2 の項）との間の相対的な重みを制御する。 $a_d = [a_{d,r}^T \ a_{d,l}^T]^T$ は、左右両足の目標加速度であり、詳細を後記する。

【 0 1 0 4 】

全体的に、式(48)は、3つのタスク対象：運動量変化率と、上体の動作の型(style)と、接触制約と、を有する逆運動学問題とみなすことができる。式(22)を強力な制約として扱うことによって、式(22)は、他の制約よりも優先される。式(48)は、式(48)を線形方程式の条件付き最小二乗問題に置き換えることによって解かれる。

【0105】

最後に、逆動力学を実行することによって、 $\ddot{\theta}_a$ および許容外力から、フィードフォワードトルク入力情報 τ_{ff} が計算される。一実施形態において、浮遊基盤機構に対して逆動力学を実行するのに役に立つハイブリッド系力学アルゴリズムを用いることができる。外力は、地面と接触するすべてのリンクの陽関数で特定されるので、多くのリンクが地面と接触しているときでさえもロボットを開ループ系として扱うことができる。したがって、開ループ系に対して逆動力学アルゴリズムを用いることができる。

10

【0106】

全体トルク入力情報は、フィードバック項を追加することによって決定される。

$$\tau_s = \tau_{ff} + \tau_{fb} \quad (49)$$

【0107】

ここで、 $\Gamma_p = \text{diag}(\gamma_{p,i})$ および $\Gamma_d = \text{diag}(\gamma_{d,i})$ はそれぞれ、比例利得および微分利得である。位置命令および速度命令 θ^* , $\dot{\theta}^*$ は、 $\ddot{\theta}_a$ の時間積分から決定される。

20

【0108】

(E. 両足の目標動作)

上記したとおり、両足の目標動作は、バランス制御コントローラへの入力情報としての役割を果たす。一実施形態において、両足の目標足加速度 a_d は、それぞれの足が目標位置 $T_d \in \text{SE}(3)$ および目標速度 $\mathbf{v}_d \in \text{se}(3)$ を有するように設定される。具体的には、足の各々に対して、以下のフィードバックの式を用いる。

$$a_{d,i} = k_p \log(T_i^{-1} T_{d,i}) + k_d (\mathbf{v}_{d,i} - \mathbf{v}_i) \quad (50)$$

30

ここで、 $i \in \{r, l\}$ に対して、 k_p および k_d は、それぞれ、比例フィードバック利得および微分フィードバック利得である。 $\log : \text{SE}(3) \rightarrow \text{se}(3)$ という写像は、変換行列に相当するねじれ座標を計算する。ロボットが、例えば加速度計およびジャイロスコープから胴体の位置および速度を推定できると仮定すれば、一つの足の位置 T および速度 \mathbf{v} は、順運動学的演算から計算できる。静止した支持足に対しては、前記した位置および速度といった値を、 $\mathbf{v}_d = \mathbf{0}$ および $T_d = T$ と設定できることは自明である。

40

【0109】

このようにして、ロボット制御装置200は、人型ロボットを制御して、非水平、不連続、および非平坦の地面上でバランスを維持する。ロボット制御装置200が、ロボットの線形運動量および角運動量の両方を制御することによって、ロボットは、比較的大きな揺乱の下でバランスを維持するとともに、人間のようにバランスをとるように振る舞うことでそのような揺乱に反応することができる。従来のロボットの正味COPおよび正味G RFを用いることなく、支持足の各々におけるCOPおよびGRPを決定することによって、ロボット制御装置200は、足各々において地面の形状および地面の摩擦が異なる場合に対処できる。

(足の踏み出し制御による軌跡)

ステップ制御コントローラ214がロボットを制御して足を踏み出させるとき、軌跡が、COPと、決定したGFPを与えられた振り足と、について決定される。図15は、ロボットのCOP、 \mathbf{r}_G と振り足 T_r の軌跡の例を示す。COPの軌跡は、線形運動量の変化率(式(17))に関する参照矢印である。そして、振り足の軌跡は、上述のバランス制御技術における最適解の1つである。一実施形態において、各々の軌跡は、次のように定義される二次のベジェ曲線である。

$$\mathbf{T} = (1-t)^2 \mathbf{T}_0 + 2(1-t)t \mathbf{T}_1 + t^2 \mathbf{T}_2, t \in [0, 1] \quad (51)$$

【0110】

平面のCOP軌跡では、現在のCOP、 \mathbf{r}_G 、軸足位置 T_l 、その軸足と目標着地点

の間の真ん中、 $\frac{T_l + T_r}{2}$ を使用する。ここで、 T_l は軸足位置である。 T_r は振り足位置である。 T_r は振り足についての目標着地点である。軸足の中心を使う理由は、ロボットが安定した足の踏み出しを行うことができるよう、軸足跡内を動いているCOPを実現することである。COP軌跡の高さは、ロボットを、斜面上のリムなし車輪モデルとしてモデル化することによって、設計できる。振り足の軌跡は、 T_r 、わずかに持ち上げられた T_r と T_l を使う。円滑な動作のために、軌跡の速度は、それが始まりと終わりでゼロ速度を持つように、パラメータ化される。軌跡の期間は、単純化されたモデルと実際の人型ロボットの間の相違を考慮する安全係数(70%)によって増やされた足の踏み出しの時間長から、得られる。

【0111】

(バランス制御コントローラの応用)

上記した制御枠組みを用いると、ロボット制御装置200は、ロボットを制御し、押されたことに反応してバランスを維持できる。図16A-16Bは、さまざまな揺乱を受けたり、および/または、非水平や非平坦である複数の支持体上に直立していたりする場合におけるロボットの動作を例示する。これらの例の各々において、ロボットの最初の状態情報202は安定的である。しかし、ロボットは、押されたことに反応して足を踏み出すことを決定する。図16Aにおいて、例えば、ロボットは、上り坂斜面の前に立っているときに、後ろから押される。その押されたことに反応して、ロボットは、×印により示されるGFP位置1602を決定する。GFP位置1602は足の外側の位置に決定されたので、ロボットは足を踏み出してバランスを維持する。図16Bは、下り坂斜面についての同様の状況を例示する。下り坂なので、GFP位置1604は、ロボットから、より遠い。そのため、ロボットは、より大きく足を踏み出す。

【0112】

10

20

30

40

50

上述したように、ロボットは、水平な地面上と非水平な地面上で、押されたことに対する回復に関する統一された枠組みを使うことで、運動量に基いた姿勢バランス制御と反応的な足の踏み出しどとを選択的に使うことにより、押されたりする外部搅乱に対応して、バランスを維持することができる。線形運動量をそのままにする制御コントローラと角運動量をそのままにする制御コントローラを切り替えることによって、二足ロボットは、外部搅乱の大きさに応じて、足を踏み出すか、足を踏み出すことなく再びバランスを保つか、選択できる。G F P E は、非水平な地面上で足の踏み出しのための着地位置を有効に提供する。G F P E の望ましい特性は、以下を含む。

1) その点は予測的であるので、制御コントローラは早く足の踏み出しを開始できる。

2) 多くの従来提案された参考文献ではその点は非水平な地面上に存在できなかったが、本発明におけるその点は、非水平な地面上に存在できる。

3) その点の計算は、その点自体の位置だけでなく、足の踏み出しのために必要な時間を与える。

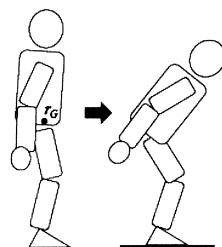
【 0 1 1 3 】

本発明の開示内容を読む場合、当業者であれば、本明細書で説明した特徴を備えるロボット制御装置について、さらに別の代替的な設計を理解できるであろう。したがって、本発明の具体的な実施形態および応用が説明され、記述されていてもその一方で、本発明が本明細書に開示されている、まさにその創作物および構成要素には限定されないこと、そして添付の特許請求に範囲に定められた発明の趣旨および範囲から逸脱することなく当業者にとって明らかであるさまざまな修正、変更、バリエーションが、本明細書に開示されている本発明の方法および装置の設定、操作および詳細においてなされること、が理解されるであろう。

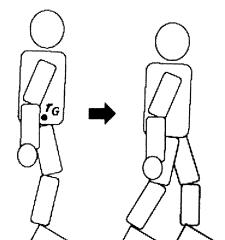
10

20

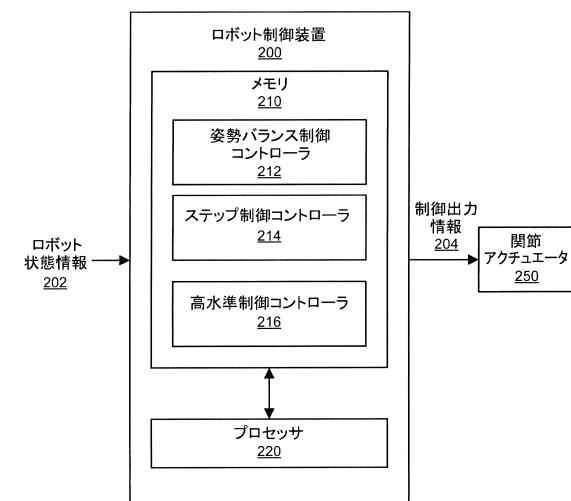
【 図 1 A 】



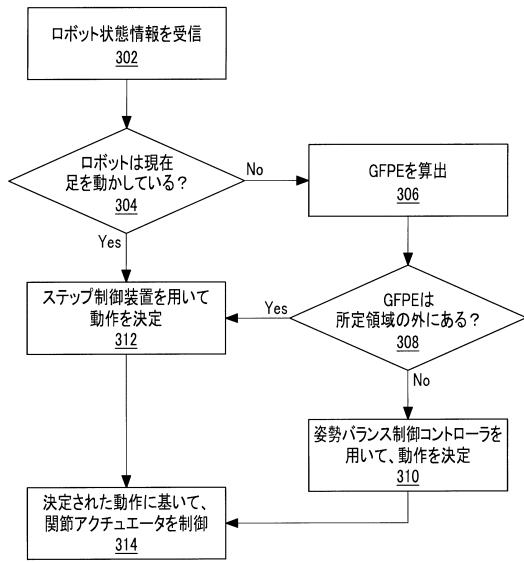
【 図 1 B 】



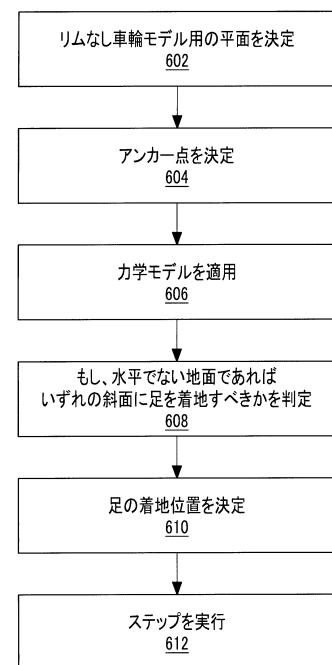
【 図 2 】



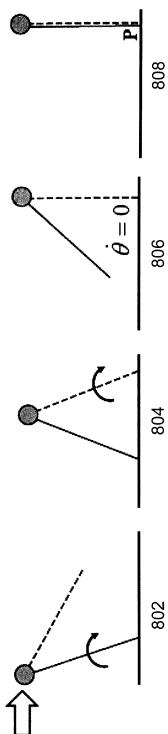
【図3】



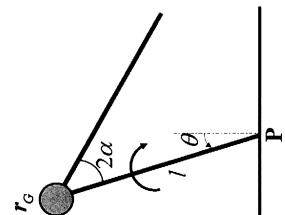
【図6】



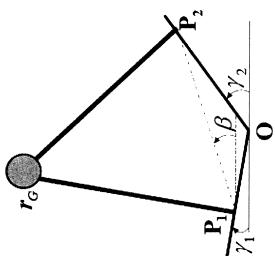
【図8】



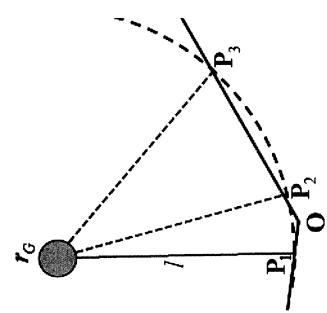
【図9 A】



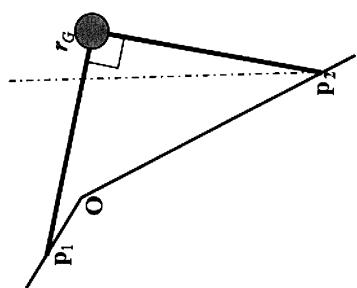
【図9 B】



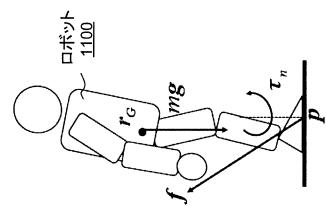
【図 10 A】



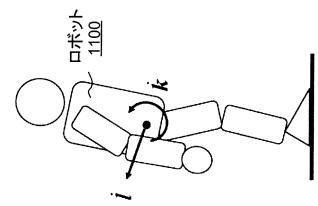
【図 10 B】



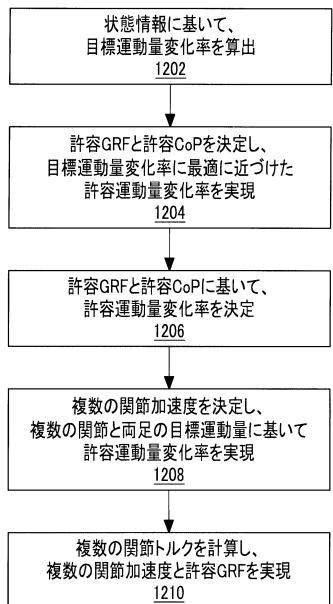
【図 11 A】



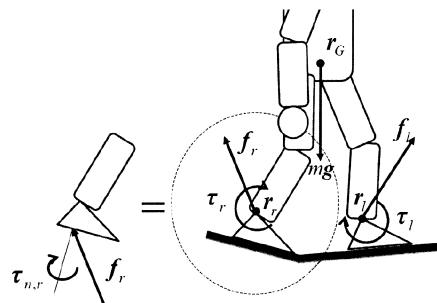
【図 11 B】



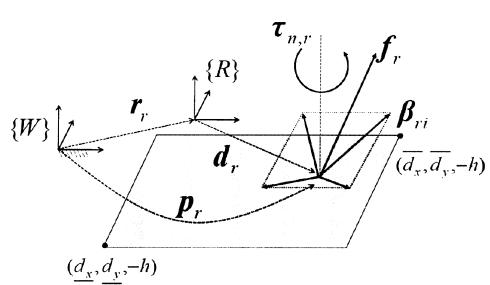
【図 12】



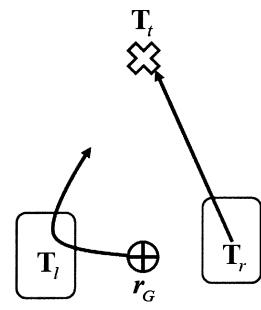
【図 13】



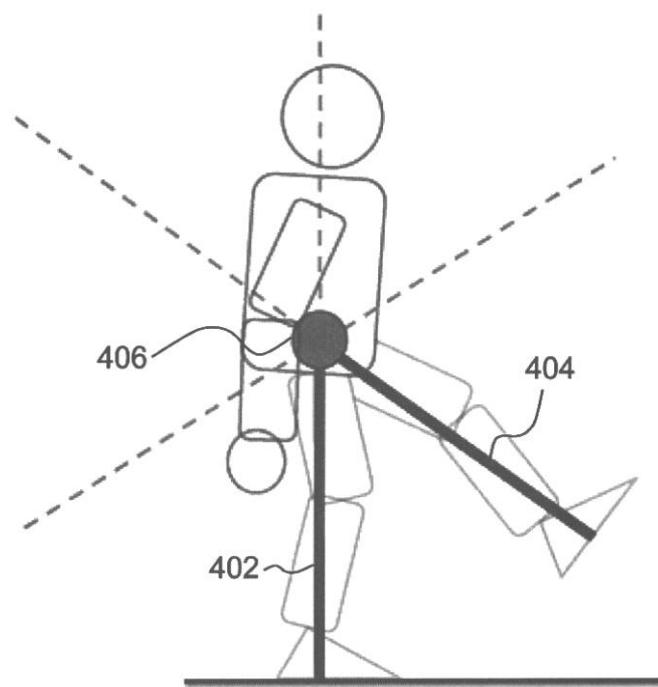
【図14】



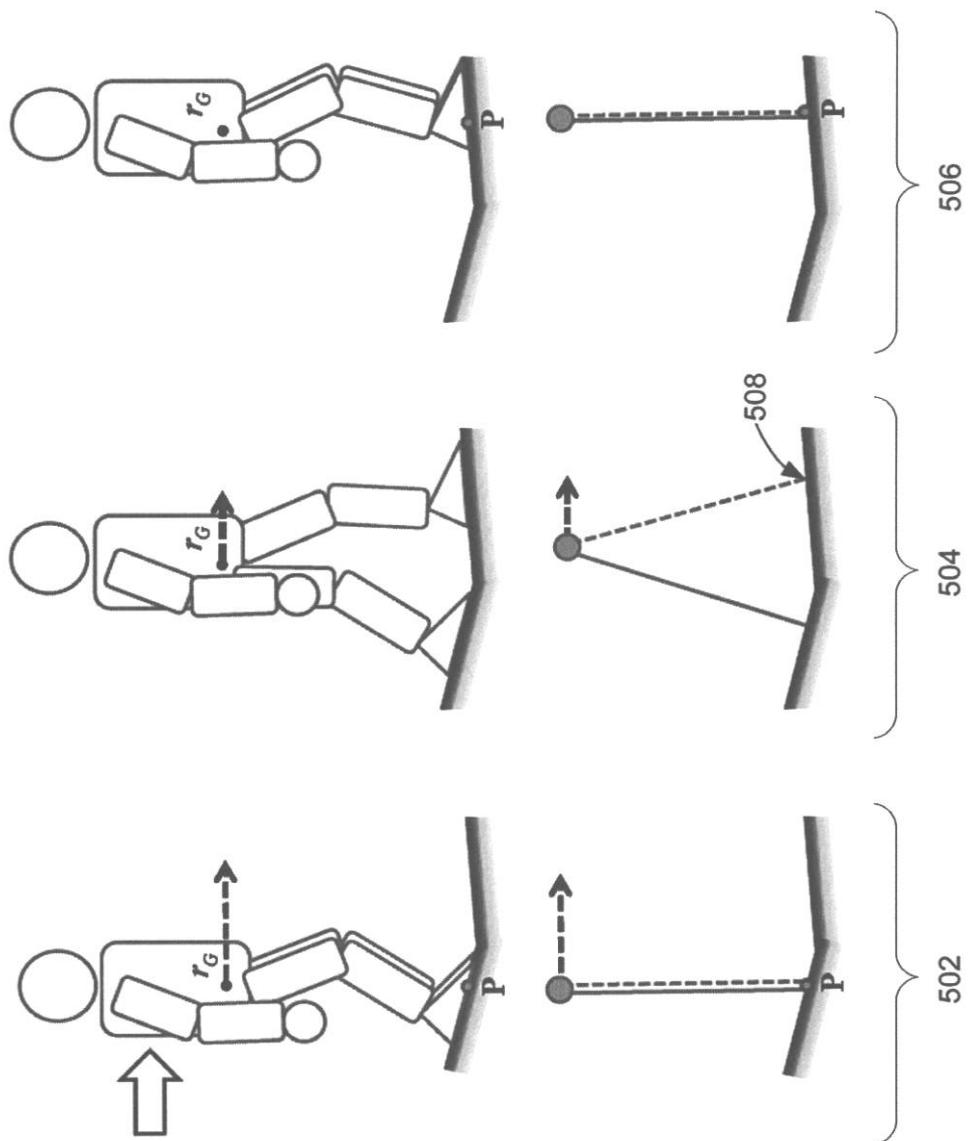
【図15】



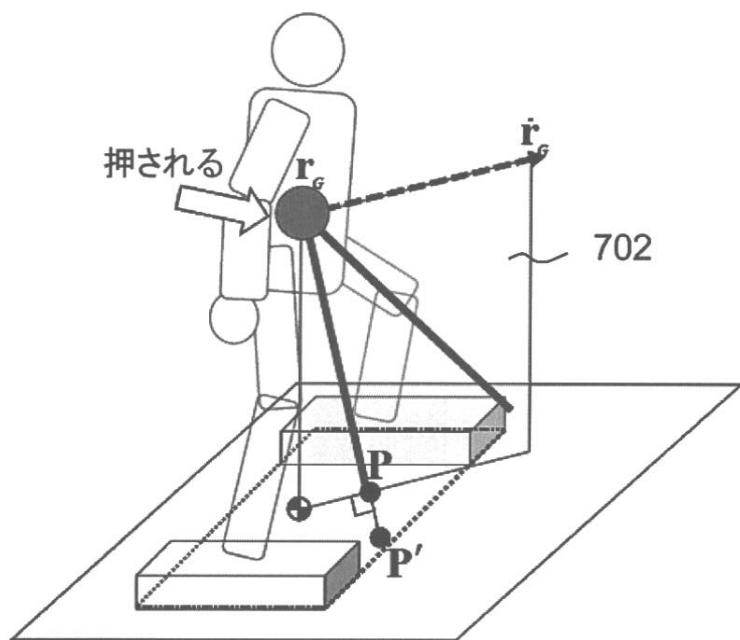
【図4】



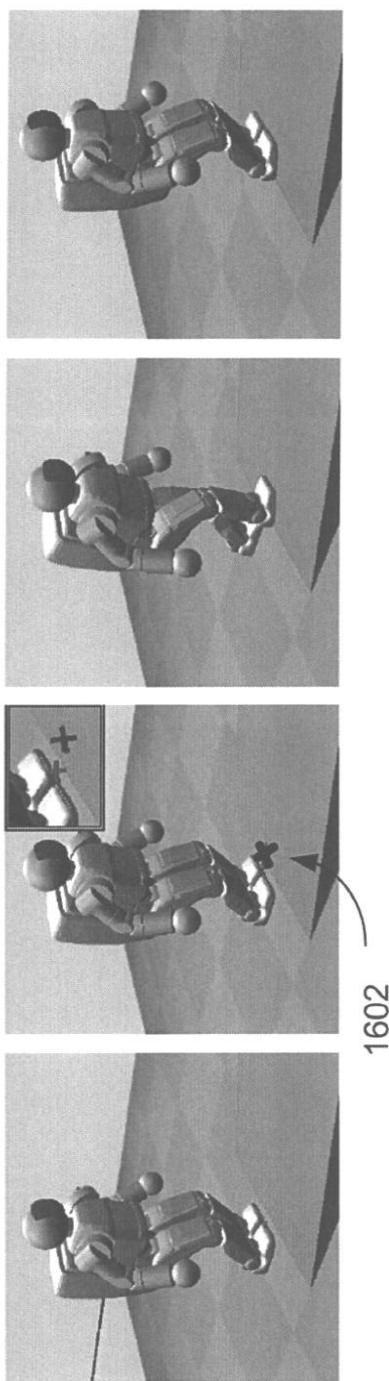
【図5】



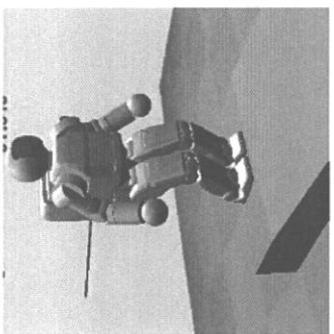
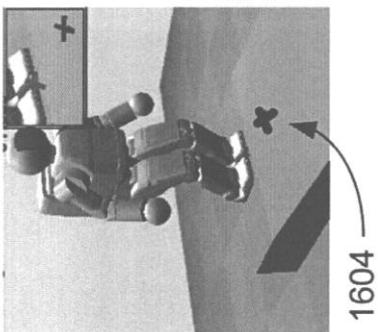
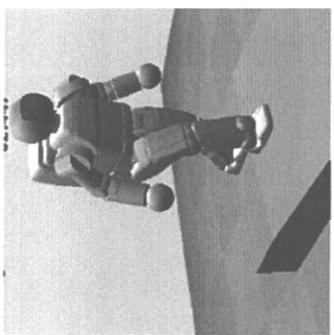
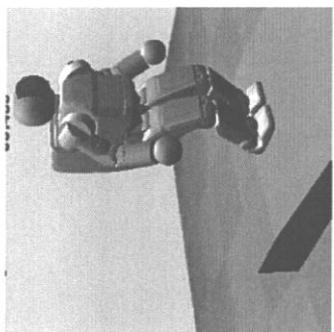
【図7】



【図 1 6 A】



【図16B】



フロントページの続き

(72)発明者 ゴスワミ、アムバールシュ

アメリカ合衆国、オハイオ州 43067-9705、レイモンド、21001 ステート ルート 739、ホンダ パテント アンド テクノロジーズ ノース アメリカ エルエルシー気付

(72)発明者 リー、ソンヒ

アメリカ合衆国、オハイオ州 43067-9705、レイモンド、21001 ステート ルート 739、ホンダ パテント アンド テクノロジーズ ノース アメリカ エルエルシー気付

審査官 臼井 卓巳

(56)参考文献 特開平06-170757(JP,A)

特開2006-116672(JP,A)

特開2009-184034(JP,A)

米国特許出願公開第2008/0133053(US,A1)

米国特許出願公開第2009/0132087(US,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 5/00