T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	2脚ロボットの歩行・走行歩容生成と姿勢制御
Title(English)	
著者(和文)	竹中透
Author(English)	Toru Takenaka
出典(和文)	学位:博士（工学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:乙第4120号, 授与年月日:2015年11月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:山北　昌毅,三平　満司,井村　順一,岡田　昌史,塚越　秀行,梶田　秀司
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4120号, Conferred date:2015/11/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

2脚ロボットの歩行・走行歩容生成と姿勢制御

2015年

竹中　透

目次

第１章 緒論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.1 背景と本研究の目的 2
1.2 本研究の位置付け 2
1.3 本論文で提案するシステムの概要 6
1.4 本論文の構成 8
第２章 ロボットの機構 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9
2.1 はじめに 10
2.2 ハードウェア全体構成 10
2.3 諸元 12
第３章 2脚ロボットの動力学 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
3.1 はじめに 16
3.2 基本的な用語の定義 16
3.3 目標歩容の関節角を目標値とする変位制御ロボットの挙動 18
3.3.1 実世界での総慣性力と床反力のつり合い関係 19
3.3.2 理想的な目標歩容に追従している理想歩行状態 25
3.3.3 理想的でない歩行状態 21
3.4 まとめ 22
第４章 自在歩行歩容生成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
4.1 はじめに 26
4.2 歩行歩容生成システム 27
4.3 動力学モデル 28
4.3.1 3質点モデル 28
4.3.2 発散成分と収束成分 31
4.3.3 目標 ZMP 軌道が発散成分に及ぼす影響 32
4.4 近似歩容生成手法 34
4.4.1 近似歩容生成の全体フロー 34
4.4.2 定常歩容の初期発散成分の算出 35
4.4.3 今回歩容の ZMP 軌道パラメータの修正 36
4.5 歩容生成シミュレーション 37
4.5.1 3質点モデルの近似精度 38
4.5.2 発散成分による接続の効果 40
4.5.3 歩容生成例 41
4.6 まとめ 43
第５章 自在走行歩容生成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
5.1 はじめに 46

5.2 走行歩容生成システム 46
5.3 動力学モデル 47
5.3.1 鉛直運動成分 48
5.3.2 水平運動成分 49
5.3.3 回転運動成分 50
5.3.4 運動の合成 50
5.3.5 水平床反力の制限を考慮した運動合成 51
5.4 定常歩容に漸近する歩容の生成 53
5.4.1 継続性を保証する歩容パラメータの決定法 53
5.4.2 定常歩容の初期状態の探索 54
5.4.3 鉛直加速度変化を考慮した発散成分の提案 55
5.4.4 今回歩容倒立振子の定常歩容初期発散成分への接続 58
5.4.5 今回歩容フライホイールの定常歩容への接続 58
5.5 走行歩容の生成例 59
5.6 まとめ 61
第6章 フルモデル補正 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
6.1 はじめに 64
6.2 歩容生成システム 64
6.3 幾何学的写像部 67
6.4 フルモデルを用いた目標歩容補正 69
6.5 補正用摂動動力学モデル 70
6.5.1 上体水平運動成分 70
6.5.2 上体回転運動成分 71
6.6 目標歩容の補正手法 72
6.6.1 床反力の制限がないフィードフォワード型補正手法 72
6.6.2 水平床反力を許容範囲に制限する補正手法 74
6.6.3 水平床反力と床反力モーメントを許容範囲に制限する補正手法 76
6.6.4 2次元リミッタ 78
6.6.5 フィードバック型補正手法 79
6.7 歩容補正シミュレーションと走行実験 80
6.8 まとめ 85
第7章 初期の歩行制御システムと姿勢安定化制御 ・・・・・・・・・・ 87
7.1 はじめに 88
7.2 初期の制御システムの構成 88
7.3 床反力制御の開発経緯 89
7.4 足首コンプライアンス制御 90
7.5 足首コンプライアンス制御の問題点 96
7.6 まとめ 97

第８章　複合コンプライアンス制御　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　99
8.1 はじめに　100
8.2 複合コンプライアンス制御システム　100
8.3 復元力モーメント要求値分配器　105
8.4 両脚コンプライアンス角決定　108
8.5 足部コンプライアンス角決定　111
8.6 補償目標歩容決定　114
8.7 床形状偏差推定　115
8.8 段差通過時の複合コンプライアンス動作　122
8.9 複合コンプライアンス制御による上体位置・姿勢偏差挙動の倒立振子化　125
8.10 複合コンプライアンス制御下での上体傾き偏差の運動方程式　126
8.11 並進コンプライアンス制御　131
8.12 足部柔軟構造の効果　132
8.13 まとめ　133
第９章　大局的姿勢安定化制御　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　135
9.1 はじめに　136
9.2 大局的姿勢安定化制御の基本原理　136
9.3 モデル ZMP 制御が働く場合の上体傾き偏差の運動方程式　139
9.4 簡易型大局的姿勢安定化制御システム　140
9.5 発展型大局的姿勢安定化制御システム　149
9.6 水平床反力の許容範囲を考慮したモデル ZMP 制御　150
9.7 まとめ　152
第１０章　結論　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　155
10.1 本論文による成果　156
10.2 今後の発展　160
謝辞　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　161
付録　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　163
付録 A 本論文で定義される COP と一般的な COP との関係　164
付録 B 重心まわりの擬似角運動量保存　167
付録 C 倒立振子安定化制御則　169
付録 D 用語の定義　174
参考文献　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　187
研究業績　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　191

第 1 章. 緒論

第１章. 緒論

本論文では，2 脚ロボットに，歩行，走行など多様な形態で自在に移動する能力を与え，かつ，この能力を活かした多様な姿勢復元動作によって，踏ん張りだけでは得られない高いバランス能力を獲得させるための，リアルタイム自在歩容生成と姿勢制御から成る制御システムを提案する．

1.1 背景と本研究の目的

近年，生活空間の中で人に奉仕したり，災害現場などのように危険が伴う環境で人に代わって活動したりする人型ロボットに期待が集まっている．

このような活動を行うロボットは，人型が最適とは限らないが，人型は以下の点で有利である．

1) 人の生活環境は人に適したようにできているから，人型ロボットは同環境に適合し易い．
2) 人と同じ挙動特性を持つことで，人と協調し易い．

特に，2に関して説明を加えると，人型ロボットと人は，物理的に同調し易いだけでなく，両者は互いに相手の挙動を予測し易いので，両者が協力してひとつの物を運んだり，並んで歩いたりすることが容易になる．

一方，人は，様々な状況変化に機敏に対応して，歩行，走行など多様な形態で自在に移動する能力を備え，かつ，この能力を活かした多様な姿勢復元動作を行うことで，踏ん張りだけでは得られない高いバランス能力も獲得している．例えば，周期的な歩行運動を行っているときに倒れそうになると，足裏で踏ん張って運動を維持しようとしたり，瞬間的に上体の動きを変えたり，着地位置やタイミングを変えたり，さらには，これらを複合させたりと，臨機応変な姿勢復元動作を行うことができる．人型ロボットが人と共存し協調動作を行うためには，これと同等の移動能力とバランス能力が必要と考えられる．

本研究は，人型ロボットに，上述のような人と同等の移動能力とバランス能力を与えるための基盤となる制御システムを構築することを目的とする．また，本システムの構築における基本方針を，以下のふたつに定める．

1) 任意の時点から任意の移動形態に滑らかに遷移できるように，歩行，走行など全ての移動形態が統一的に表現されること
2) 姿勢安定性が定量的に評価できるように，全ての姿勢安定化動作による復元力が陽に設計されること

1.2 本研究の位置付け

2足歩行を実現するための主なアプローチとしては，以下の3つが挙げられる．

第 1 のアプローチは，ZMP（Zero Moment Point，提唱者 Vukobratovi´c [1]）を規範とし

て目標歩容を生成して，それに実ロボットを追従させることを基本とするものである．ZMPとは，床面上のその点回りに運動によって発生する慣性力と重力の合力モーメントの水平成分が 0 となる点である．1985 年には，早稲田大学の高西ら[2]によって開発された 2 足歩行ロボット WL-10RD により，ZMP を規範とする動歩行が実現された．その後も多くの研究者によって，移動速度，安定性，移動形態の多様性，リアルタイム自在性などが進歩しつつある．

第2のアプローチは，ロボット全体を単純な倒立振子と考え，着地の位置やタイミングを離散的に制御することで安定な歩行・走行を実現するものである[3][4][5]．脚の質量が小さいロボットでの高速走行には適した手法であるが，歩行周期が長い歩行では，安定性が低下する．

第3のアプローチは，受動歩行である．受動歩行とは，アクチュエータがない単純な構造のロボットを，力学的に安定なリミットサイクルに収束させることによって，坂を下る歩行を継続させるものであり，McGeerによって実現された[6][7]．この歩行形態をアクチュエータがあるロボットに応用することで，将来，効率の良い歩行が実現されると期待されている．

本論文では，運動能力とバランス能力における多様性と自在性を重視して，第 1 のアプローチを採用する．さらに，第 2 のアプローチに相当するバランス機能を包含することも試みる．

ZMPを規範とするロボット（以降，ZMP規範型ロボットと呼ぶ）では，ZMPを規範として歩容生成部によって目標歩容を生成し，追従制御部によって実ロボットの関節角を目標歩容の関節角に追従させることを基本とする．しかし，これだけでは，床面の凹凸や外乱によって上体傾き偏差が大きくなったり転倒したりするおそれがあるので，床面の凹凸を吸収するコンプライアンス制御や上体傾き偏差に応じた姿勢安定化制御も必要となる．

本論文では，目標運動と目標床反力の組を目標歩容と定義する．以下に，目標歩容に関して，人と同等の運動を実現するために，特に動力学的に留意すべき要件を列挙する．

1）復元力余裕が大きいこと
2）動力学的精度が高いこと
3）実機に無理な負荷と振動が発生しにくいように，関節角加速度変化と床反力変化が穏やかであること
4）バランスを崩す大きな原因であるスリップが発生しにくいように，目標床反力が床摩擦力の限界を越えないこと

ここで，「復元力余裕が大きい」とは，目標ZMP軌道が，極力，支持多角形（厳密には，COP’の存在可能範囲．付録Dの支持多角形の項を参照）の中央付近を通り，変動が少ないことである．このように目標ZMP軌道を設定することにより，姿勢安定化制御において，復元力を，極力，前後および左右方向に偏りがないように発生させることができる．

「動力学的精度が高い」とは，動力学的誤差が少ないことである．動力学的誤差とは，実ロボットと同一の動特性を持つ理想的な動力学モデルを仮定し，そのモデルの運動を目標歩

容の運動に一致させた場合に発生する総慣性力と，目標歩容の床反力との差である．動力学的誤差があると，上体傾き偏差が発生する．上体傾き偏差が減少するように足部の姿勢（あるいは足部が発生する床反力モーメント）を操作する姿勢安定化制御を行って，そのゲインを高くすると，短期的には，かえって足底の圧力分布が大きく偏り，回転滑りが生じ易くなる．すなわち，動力学的誤差が上体傾き偏差に及ぼす影響を，単に姿勢安定化制御のゲインを高くすることで軽減するには限界がある．

目標歩容の生成手法は，大別すると，時間関数で設定された足部軌道とZMP軌道とに基づいて，順動力学モデルによって上体運動を生成する手法[4][8]～[12]と，時間関数で設定された足部軌道と上体運動とから逆動力学モデルによって求められるZMP軌道の復元力余裕が大きくなるように，時間関数のパラメータ値を探索する手法[13]に分類される．後者は，瞬間的に目標歩容の慣性力を陽に修正することが困難であるので，後述するモデルZMP制御（仮想外力によって，目標歩容の総慣性力と床反力のバランスを崩すことで姿勢を安定化する制御）には適さない．故に，本論文では，前者の手法を採用する．

前者の手法では，目標運動が発散する（上体水平位置が目標ZMPから離れていく）傾向があるので，歩容の継続性（具体的には，上体水平位置が支持多角形から遠くに離れ過ぎないこと）が保証されるように目標ZMP軌道を決定または修正しなければならない．

実ロボットと同一構成のリンクと関節から構成されるような詳細な動力学モデル（以降，フルモデルと呼ぶ）を直接的に用いて，目標 ZMP 軌道を満足する目標運動を生成する手法が考えられるが，非線形が強いために解析的に運動を予測することができず，継続性を保証する目標 ZMP 軌道をリアルタイムに求めることは困難である．このため，歩容をリアルタイムに生成する研究の多くでは，高さが一定の（あるいは鉛直加速度が発生しない）線形倒立振子が用いられてきた[4][8]～[12]．しかし，このような単純な動力学モデル（以降，単純モデルと略す）を用いて目標歩容を生成すると，歩行速度が高くなるにつれ，動力学的誤差による姿勢安定性への影響が無視できなくなり，転倒のおそれが大きくなる．この課題に対しては，これまで，まず単純モデルを用いて近似歩容を生成し，この歩容をフルモデルによって動力学的精度が高くなるように補正する手法（以降，フルモデル補正と呼ぶ）が提案されてきた[14][15][16]．本論文では，従来と同様，近似歩容生成とフルモデル補正とから成る構成を採用しつつも，さらに，走行や跳躍のような鉛直床反力(並進床反力の鉛直成分)が 0 または微小となる期間を有する歩容（以降，走行歩容と略す）までも統一的に生成できるように拡張した手法を提案する．

継続性が保証された今回歩容（現時点から1～2歩先までの歩容）を生成するために，Nagasakaら[8]，Haradaら[9]，Nishiwakiら[10]，Kurazumeら[11]は，今回歩容の終端条件として，上体または重心の位置と速度をヒューリスティックに設定し，この条件を満足するように，時間関数で表される目標ZMP軌道の関数パラメータ値を決定している．しかし，これらの手法では，終端条件が厳しく，急激な運動変化を伴う歩容を生成する場合に，目標ZMP軌道が大きく変動する傾向がある．この問題に対し，Sugiharaら[12]は，目標ZMP軌道の連続性や

重心位置・速度の厳密な接続を要求しないことで，境界条件を緩和している．しかし，これらの不連続性は，実際のロボットの姿勢制御において，アクチュエータの急激な負荷変動とリンクの振動を生じさせてしまう恐れがある．一方，Kajitaら[17]は，予見制御理論を用いて，予見終端時刻において上体が目標ZMPの真上に到達するように，各瞬間の目標ZMP 位置を操作して歩容を生成する手法を提案している．しかし，このようなフィードバック制御手法では，例えば，片脚のつま先だけが接地している瞬間のように支持多角形が狭い時期に，目標ZMP 位置が支持多角形から逸脱する恐れがある．また，以上の手法においては，スラロームなどの多様な歩行に対して，継続性が保証できる適切な終端条件を設定することも難しい．さらに，走行歩容に適用できない．

本論文では，継続性を保証しつつ，これらの問題を解決する境界条件の設定法を提案する．

姿勢安定化制御に関して述べると，多くの2脚ロボットにおいて，足首トルク制御が用いられてきた[2][18][19]．しかし，減速機などの摩擦の影響により，大きなトルク偏差が発生しやすい．また，かかと着地，つま先蹴りのように，接地期に足部の姿勢が変化する歩行では，足部の実姿勢が目標姿勢から乖離しないようにしつつ床反力を適切に制御することが困難である．長阪ら[20]は，上体を水平に移動させることによって，接地状態が維持されるように実COPを制御しつつ上体傾きを安定化する「体幹コンプライアンス制御」を提案した．上体位置の水平移動を用いて間接的に安定度を高めているが，足首トルク制御のような直接的に実COPを制御する手法との融合が課題となる．

本論文では，かかと着地，つま先蹴りのように，接地期に足部の姿勢が変化する場合でも，姿勢安定化にとって適切な復元力を発生させる床反力制御を提案する．また，本論文で提案する自在な歩容生成能力を活かして，床反力制御だけでは得られない高い復元力が得られ，かつ復元力が陽に設計できる姿勢制御手法を提案する．

以上のように，本論文では，走行歩容までも統一的に生成できるように拡張された，単純モデルを用いた近似歩容生成とフルモデル補正とから成る歩容生成手法を提案する．近似歩容生成においては，継続性が保証された復元力余裕の大きい目標歩容が生成されるように今回歩容の境界条件を緩和する．また，かかと着地，つま先蹴りのように，接地期に足部の姿勢が変化する場合にも対応できる床反力制御と，自在な歩容生成能力を活かした，復元力が陽に設計できる姿勢制御手法を提案する．

本論文では，さらに，これらの手法を力の次元で有機的に結合することによって，人型ロボットに人と同等の移動能力とバランス能力を与えるための基盤となる制御システムの構築をめざす．

なお，本論文では，主に，支持多角形や床摩擦の限界など，2脚ロボット固有の力学的な制約に関して議論し，関節角・角速度の制限など運動学的制約に関しては議論しない．

1.3 本論文で提案するシステムの概要

Fig.1.1 に示すように，本論文で提案する制御システムは，シナリオ作成部（Scenario planning），歩容生成部（Gait generation）および姿勢制御部（Posture stability control）から成る．また，歩容生成部は，近似歩容生成部（Estimated gait generation）とフルモデル補正部（Dynamics compensation using full model）から成る．さらに，近似歩容生成部は，歩容パラメータ決定部（Determination of gait parameters），単純モデル歩容生成部（Gait generation using simple model）および幾何学的写像部（Kinematic mapping）とから成る．

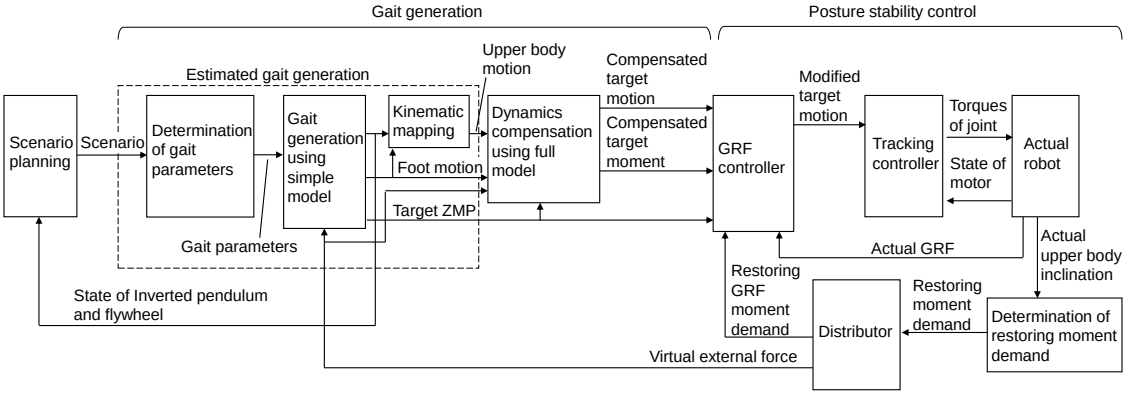


Fig.1.1 Total control system

単純モデルとしては，上体並進運動を表す鉛直加速度が 0 または時変の線形倒立振子，支持脚/遊脚足部質点，および全体重心を変化させずに上体を傾ける運動を表すフライホイールから成るモデルを提案する．本モデルは，線形倒立振子モデルが持つ挙動解析の容易性を残しつつ，脚の振りによる反力を考慮することで，1 質点の倒立振子よりも近似精度が高く，また走行歩容にまで適用できる．（第４章）（第５章）

また，歩容パラメータ決定部において，水平床反力（床摩擦力）の許容範囲を設定し，これと目標 ZMP 軌道を満足するように，単純モデル歩容生成部において倒立振子水平軌道と上体姿勢軌道を生成する手法を提案する．この手法により，スリップしにくい走行歩容が生成される．（第５章）

今回歩容の終端条件としては，倒立振子の運動の水平成分が，発散成分と収束成分に分解できることに着目して，今回歩容に続く定常歩容を暫定的に設定し，今回歩容の終端発散成分が定常歩容の初期発散成分に一致するように，今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する手法を提案する．この手法により，比較的小さい目標 ZMP 軌道の修正量で，今回歩容は定常歩容に漸近する．この結果，安定余裕が高く，継続性が保証された歩容が生成可能となる．（第４章）（第５章）

幾何学的写像部では，単純モデルの変位と両足部位置・姿勢角を基に，幾何学的写像部用

のフルモデル（以降，写像用モデルと呼ぶ．）の上体位置・姿勢角が決定される．従来では，上体に固定された代表点の水平位置またはフルモデル（写像用モデル）の全体重心水平位置と，単純モデルの重心水平位置（1 質点倒立振子の場合，質点水平位置）に一致させる手法が一般的であったが，本論文では，この機能に加え，高速歩行や走行にも対応できるように，全体重心まわりの角運動量変化誤差（写像用モデルの全体重心まわりの角運動量変化と単純モデルの全体重心まわりの角運動量変化の差）を，動力学を用いずに低減する手法を提案する．（第６章）

フルモデル補正手法に関しては，フルモデル上で発生する目標 ZMP まわりの床反力モーメント水平成分を低減することに加え，走行歩容にも適用できるように，同モーメント水平成分と水平床反力がそれぞれの許容範囲を越えないように，上体位置と姿勢角を補正する手法を提案する．（第６章）

以上の歩容生成手法により，接地期と滞空期の区別なく，また，歩行と走行の区別もなく，同一モデルと同一のアルゴリズムを用いて，統一的に多様な歩容を生成することが可能となる．

姿勢制御に関しては，「複合コンプライアンス制御」による床反力制御，「モデル ZMP 制御」と「長期シナリオ修正制御」とから成る「大局的姿勢安定化制御」を提案する．（第９章）

複合コンプライアンス制御は，目標 ZMP まわりに両足部を公転させ，さらに目標支持脚/遊脚 COP まわりに支持脚/遊脚足部を自転させることで，床の想定外の凹凸が各脚床反力に及ぼす影響を低減すると共に，姿勢を安定化するために必要な床反力モーメント（床反力モーメント要求値）を目標 ZMP まわりに発生させる床反力制御である．この制御により，足首トルク制御では困難であった，かかと着地，つま先蹴りのように，接地期に足部の姿勢が変化する歩容にも容易に対応できようになる．（第８章）

モデル ZMP 制御は，上体傾き偏差を低減するために，目標歩容を生成する動力学モデル（上述の単純モデルと補正用フルモデル）に仮想外力を加える制御であり，仮想外力が目標 ZMP まわりに作用するモーメントの（-1）倍の復元力が発生する．仮想外力によって目標運動が修正されるので，目標運動修正に起因する姿勢復元力が定量化され，踏ん張り（床反力制御）との複合的な姿勢復元動作を可能とする．Fig.1.1 に示す分配器が，踏ん張りの限界を考慮して，踏ん張り力と仮想外力の割合を調整する．（第９章）

長期シナリオ修正制御は，モデル ZMP 制御によって崩された目標歩容の状態（単純モデルの状態）を初期状態として，所定の目的が達成されるように，着地位置を修正するなど長期シナリオを修正する制御である．この制御は，歩容生成のサンプリング周期毎に，シナリオ作成部が実行する．（第９章）

上記システムにより，足裏で踏ん張って運動を維持しようとしたり，瞬間的に上体の動きを変えたり，着地位置を変えたりなどの多様な姿勢復元動作が，すべて復元力の次元で定量的に表現されるので，これらの多様な動作が組み合わさった複合的な姿勢復元動作においても，適切な復元力を陽に設計することが可能となる．

なお，本論文で提案する歩容生成手法においては，サジタル面上での運動とラテラル面上での運動が動力学的に互いに独立（非干渉）であると仮定して，単純モデルを用いて，それぞれの平面上で別々に歩容を生成し，これらを合成することで近似歩容を生成する．その後，フルモデル補正を行う．鉛直軸まわりの運動に関しても，同様な手法を用いることが可能であるので，本論文では，鉛直軸まわりの運動に関する議論は省略する．

1.4 本論文の構成

第２章では，本研究に用いている人間型ロボット ASIMO の実験機の機構を概説する．第３章では，基本的な用語を定義すると共に，2 脚ロボットの動力学を説明する．第４章では，近似歩行歩容をリアルタイムに自在に生成する手法を提案する．ただし，本章で扱う歩容は，動バランスを考える上で全体重心鉛直加速度の変動が無視できる歩容である．第５章では，走行など全体重心鉛直加速度の変動が激しい歩容を，復元力余裕が大きくかつスリップしにくいように生成する手法を提案する．第６章では，第４章または第５章で生成される単純モデル歩容を動力学的精度の高い歩容に補正する手法を提案する．第７章では，1990 年頃の開発初期の歩行制御システムと姿勢安定化制御について述べ，その問題点を明らかにする．第８章では，この問題点を解決するための複合コンプライアンス制御を提案する．第９章では，人のように，踏ん張り切れなくなると目標歩容を修正してバランスを取る大局的姿勢安定化制御を提案する．最後に第１０章で，本論文をまとめる．

なお，歩容生成と補正手法に関しては，シミュレーションと実ロボットによる走行実験によって，提案する手法の有効性を示すが，姿勢安定化制御に関しては，理論的に有効性を示す．

第２章．ロボットの機構

第２章. ロボットの機構

2.1 はじめに

本章では，筆者が研究に用いている人間型ロボット ASIMO の実験機の機構を概説する．

2.2 ハードウェア全体構成

これまで ASIMO は，Ver.1 から Ver.3 まで製品化されている．本論文では， Ver.2[21]の実験機と Ver.3 の実験機を用いる．ハードウェアに関しては，製品化されたロボットと実験機との差は,ほとんどない.Fig.2.1 に,これら ASIMO 実験機の脚機構およびセンサ配置を示す.

上体(upper body)は，上下にふたつに分割され，その間に腰軸(waist joint)（詳しくは腰ヨー軸）を備える．以降，分割された上体の上部を胸部(trunk)と呼び，下部を腰部（hip）と呼ぶ．腰軸は，歩行・走行時にはスピン（足底接地部分と床との間で回転滑りが生じて，ロボット全体の鉛直軸まわりの角度偏差が発散すること）を防ぐために使われる．

各脚には，腰部側から順に，股関節(hip joint)ヨー軸，股関節ロール軸，股関節ピッチ軸，膝関節(knee joint)ピッチ軸，足首関節(ankle joint)ピッチ軸，足首関節ロール軸の計６つの関節を備える．したがって，腰部に対する相対的な足部位置・姿勢が与えられると，脚関節の角度は一義的に決まる．

各関節軸は，AC サーボモータと波動歯車装置（ハーモニック・ドライブ減速機）によって駆動される．

腰部の中央には，3 軸の角速度センサと 3 軸の加速度センサとから成る傾斜計(inclinometer)が備えられている．

足首関節と足部との間には，床反力を検出するための６軸力センサ(6 axis force sensor)が備えられている．

足部(foot)は，Fig.2.2 に示すように，上部側と下部側に分割され，これらは４つの円柱状のゴムブッシュ(rubber bushes)を介して連結されている．ゴムブッシュは，Fig.2.3 に示すように,上方から見て四角形に配置され,これらのゴムブッシュを囲むように,ガイド(guide)が足部の下部側に設けられている．これらの構造により，足部の上部側に対して下部側は，上下の並進，ロール回転，ピッチ回転の機械的コンプライアンスを持ち，前後左右の並進，ヨー回転は拘束される．ガイドがない場合，足部が水平方向にぐらつき，その影響がロボットの姿勢傾きに現れ，姿勢制御系が発振し易くなる．

歩行運動によって発生する慣性力モーメント鉛直成分に対抗する床反力モーメント（摩擦力モーメント）を発生させるためには，足底の接地圧分布の 2 次モーメントを極力大きくすべきである．2 次モーメントを大きくするだけならば，足底の四隅に突起を設ければよいが，足底の一部をはみ出させながら階段を昇降することを考慮して，足底は，Fig.2.4 に示すように，左右中央に縦溝を有する形状としている．Fig.2.4 の斜線部以外の部分が溝部である．斜線部には，摩擦係数を高めるために，細かいジグザグの溝が設けられている．

また，床面に局所的な突起があってもガタつかず密着するように，アウターソールの内側には，発泡ゴムインナーソール(foamed rubber inner sole)（いわゆるスポンジ）が挿入されている．以降，ガイド付きゴムブッシュと発泡ゴムインナーソールを，足部柔軟構造と呼

ぶ．足部柔軟構造の効果については，8.12 節で議論する．

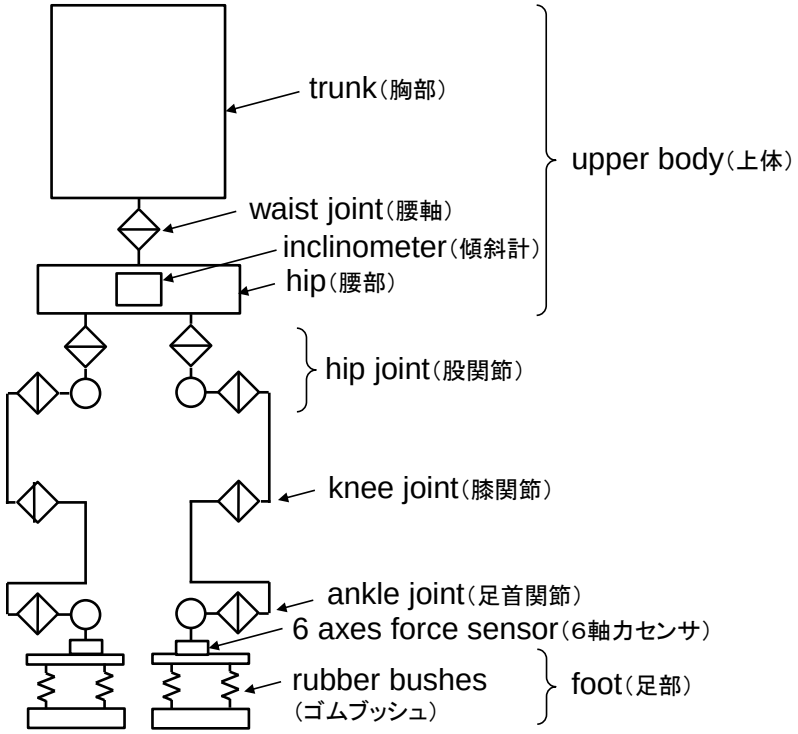


Fig.2.1 Mechanical structure of robot

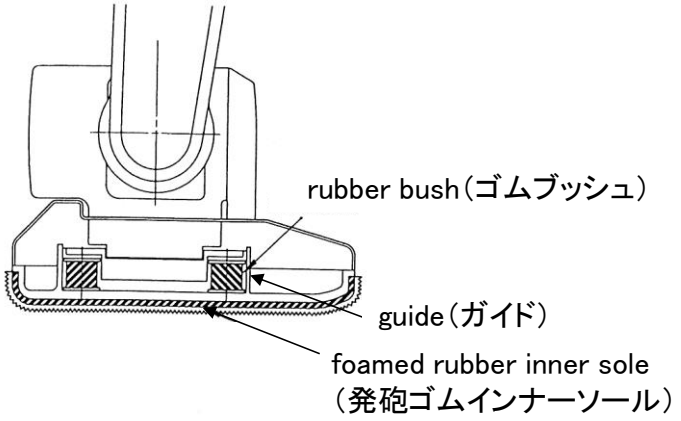


Fig.2.2 Cross section view of foot

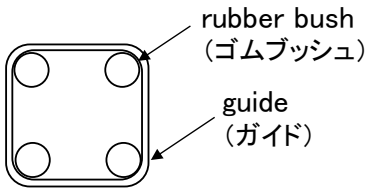


Fig.2.3 Top view of rubber bushes and guide

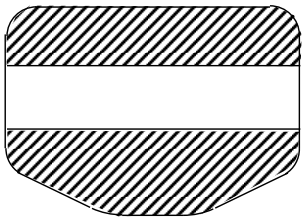


Fig.2.4 Bottom view of sole of foot

2.3 諸元

9[km/h]の走行実験（6.7 節）に用いた ASIMO Ver.3 実験機の主な仕様を以下に示す.

ASIMO Ver.3 実験機：

質量: 45[kg], 身長: 1.3[m], 全幅： 0.45[m], 奥行： 0.34[m]

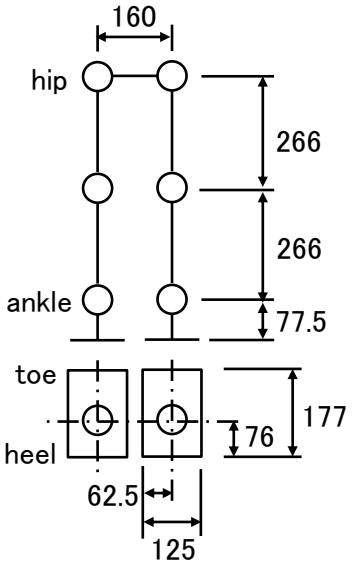


Fig.2.5 Link length of robot

9[km/h]走行以外の実験およびシミュレーションに用いた ASIMO Ver.2[2]の実験機は，質量

54[kg]である．脚リンク長（関節間距離）は，Ver.3 実験機と同じである．

第３章．２脚ロボットの動力学

第３章. ２脚ロボットの動力学

3.1 はじめに

本章では，本論文での理論展開において前提となる，ロボットのための動力学について説明する．

3.2 節では，基本的な用語を定義する．3.3 節では，目標歩容の関節角に追従するロボットの挙動を議論する．より詳しくは，まず，議論する上でのロボットと環境に関する前提条件を挙げた後，3.3.1 節で，実世界では総慣性力と床反力が常につり合っていることを述べ，3.3.2 節で，理想歩行状態について述べ，3.3.3 節で，理想的でない歩行状態における動力学的な力のつり合い関係を述べる．

3.2 基本的な用語の定義

以下に，あいまい性を排除するため，動力学に関する基本的な用語を定義する．本論文の用語は，従来の一般的な定義と異なるものが多いので，注意が必要である．

【総慣性力】(Total inertial force)

ロボットの運動によって発生する慣性力と重力の合力．(Fig.3.1 参照)

【ZMP】(Zero Moment Point)

その点まわりの目標総慣性力のモーメントの水平成分が 0 となる床面上の点．
目標総慣性力の作用線と床面との交点．(Fig.3.1 参照)
（ZMP の提唱者である Vukobratovi´c[1]による元々の ZMP の定義は，本論文の COP に相当する．Vukobratovi´c は，ZMP と COP を同一の点として扱っていた.）

Fig.3.1は，1質点系のロボットにおける重心と総慣性力とZMPとの関係を表している．1質点系では，慣性力の作用線と重力の作用線は，共に質点（重心）を通り，これらの合力である総慣性力の作用線も重心を通る．多質点系または重心まわりのイナーシャが存在する系では，慣性力の作用線および総慣性力の作用線は，重心を通るとは限らない．

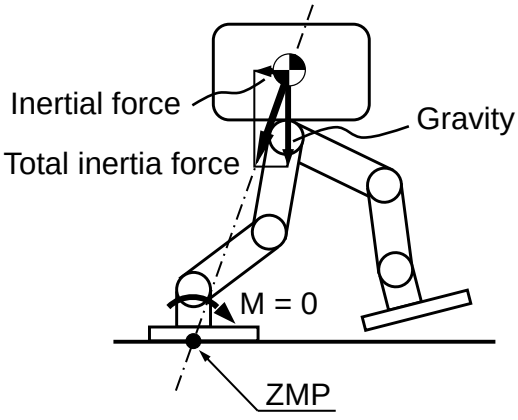


Fig.3.1 Zero moment point

【床反力】(GRF) (Ground Reaction Force)

床からロボットのすべての足底に作用する力の合力. すなわち, すべての脚床反力の合力. (Fig.3.2 参照)

【COP】(Center Of Pressure)

その点まわりの床反力モーメントの水平成分が 0 となる床面上の点.

床面上の床反力作用点. (Fig.3.2 参照)

【COP'】(Conventional Center Of Pressure)

その点まわりの床反力モーメントの床面平行成分が 0 となる床面上の点.

（従来の一般的に定義される COP)

水平面では, COP と COP'は一致する. 斜面での両者の関係を付録 A に示す.

支持多角形は, 厳密には COP'の存在可能範囲である.

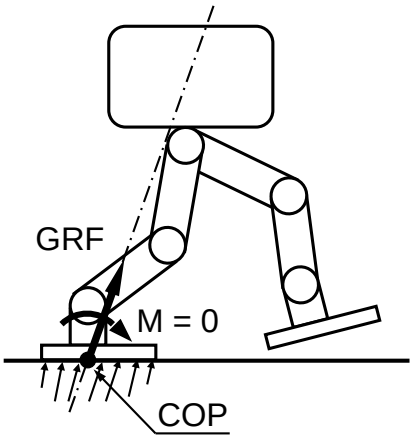


Fig.3.2 Center of pressure

【歩容】(Gait)

運動パターンと床反力パターンの組. 原則として, 歩容の一歩の期間は, 一方の脚が離床してから他方の脚が離床するまでの期間とする.

【支持脚/遊脚】(Support leg / Swing leg):

歩容の一歩の期間を, 一方の脚が離床してから他方の脚が離床するまでの期間としたときに, 便宜上, 一歩の歩容の終端で離床する脚を支持脚と呼び, 他方の脚を遊脚と呼ぶ.

【脚床反力】(Ground reaction force of foot):

床からロボットの各脚の足底に作用する力.本論文で扱う 2 脚ロボットにおいては, 支持脚床反力と遊脚床反力がある. なお,「脚」が付かない単なる「床反力」は, 支持脚床反力と遊脚床反力の合力を意味する. (Fig.3.3 参照)

【支持脚/遊脚 COP】(COP of support/swing leg)

支持脚/遊脚の足底に作用する床反力の COP.その点まわりの支持脚/遊脚床反力モー

メントの水平成分が 0 となる床面上の点. (Fig.3.3 参照)

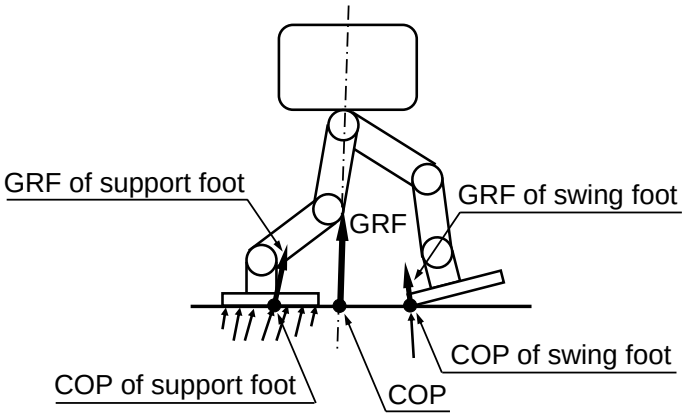


Fig.3.3 GRF and COP of each foot

なお, Fig3.4 に示すように, 支持脚の足裏が床に面接触しているときの足首位置の床への鉛直投影点を原点とし, 床に固定された座標系を支持脚座標系と呼ぶ. 以下では, 特にことわらない限り, 位置, 速度, 力などは, 今回歩容の支持脚座標系で示す.

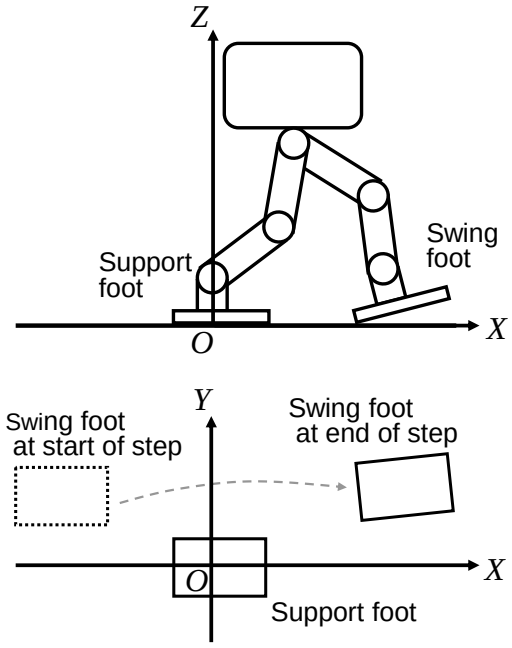


Fig.3.4 Support foot coordinate

3.3 目標歩容の関節角を目標値とする変位制御ロボットの挙動

本節では, 目標歩容の関節角を目標値とする変位制御ロボットの挙動を議論する. 本節においては, 基本的に, リンクの変形や制御系の遅れによる振動などのミクロなダイナミクスは考えない. 以下に, ロボットと環境に関する前提条件を示す.

ロボットに関する前提条件：

R1）ロボットのすべてのリンクは剛体であるとする.
R2）ロボットの足底と床との間の反発係数は 0 であるとする.（すなわち，着地衝撃を吸収するように，床反力に応じて微小に変形する粘弾性材料が備えられているものとする.）
R3）ロボットの関節角は，変位制御によって目標歩容の関節角に遅れなく忠実に追従するものとする.

環境に関する前提条件：

E1）ロボットが環境から受ける外力は，床反力だけとする.
E2）床は剛体であるとする.
E3）床面と足底の間には，粘着力が発生できないものとする.
E4）床の凹凸や段差が十分に微小であるために，目標 ZMP まわりに発生する床摩擦力モーメント水平成分は，ロボットの姿勢挙動に対し無視できる程度に微小であるものとする. 原則として，床は水平面とする.（水平面では，床摩擦力モーメント水平成分は常に 0 である.）

ところで，以下の 3 つの条件すべてを満足する目標歩容を，理想目標歩容と呼ぶ.

条件 1）歩容生成用のロボット動力学モデルと移動環境モデルの特性（パラメータ）が，それぞれ実ロボットと実移動環境の特性に一致していること.
条件 2)目標総慣性力（目標歩容の運動パターンが発生する総慣性力）と目標床反力がつり合っていること. すなわち，目標総慣性力と目標床反力の合力が 0 であること. なお，本論文で提案する歩容生成手法と姿勢制御手法は，鉛直軸まわりの運動に拡張することができるので，本論文においては，特にことわらない限り，鉛直軸まわりのモーメントに関するつり合いを無視する.
条件 3)目標床反力は実現可能なものであること. 例えば，目標歩容の COP’は，支持多角形内にあるものとする.

3.3.1 実世界での総慣性力と床反力のつり合い関係

実世界では（すなわち物理法則上），歩行を含めていかなる場合でも，Fig.3.5 に示すように，総慣性力と床反力はつり合う. すなわち，作用線が一致し，並進力成分の大きさが同じで，並進力成分の向きが互いに逆である. したがって，ZMP（実 ZMP）と COP（実 COP）は一致する.

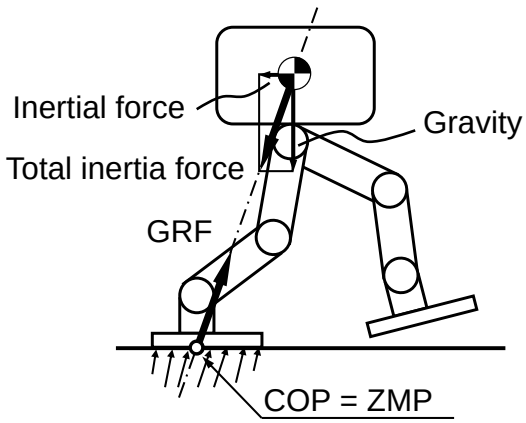


Fig.3.5 Walking in actual world

3.3.2 理想的な目標歩容に追従している理想歩行状態

実ロボットが，関節角（ローカルな姿勢）のみならずグローバルな運動（具体的には，例えば，グローバル座標系上での上体の位置・姿勢の運動）も含めて理想目標歩容の運動に正確に追従しているならば，実床反力パターンも目標床反力パターンに一致することになる．以降，この状態を，理想歩行状態と言う．なお，ここで「状態」は，瞬間状態を意味する場合もあるが，時系列や長期的なパターンを意味する場合もある．

理想歩行状態では,Fig.3.6 に示すように,目標総慣性力と実床反力は,向きが互いに逆で,大きさが同じで，作用線は一致する．また，理想歩行状態では，常に実 COP と目標 ZMP は一致する．

逆に，理想目標歩容の関節角に忠実に追従している実ロボットの状態が，ある時点において，関節角のみならずグローバルな運動状態も含めて理想目標歩容の運動状態に一致し，それ以降，実床反力パターンが目標床反力パターンに一致すれば，それ以降の実ロボットのグローバルな運動も目標運動に一致する．（動力学上，明らかである．）

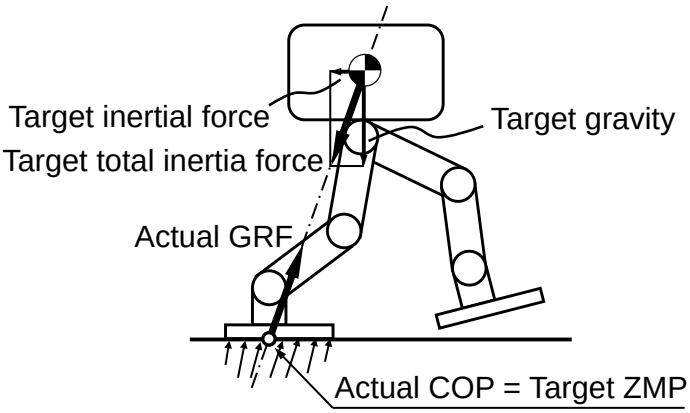


Fig.3.6 Ideal walking state

3.3.3 理想的でない歩行状態

理想歩行状態から，例えばFig.3.7に示すように，想定していない突起をつま先で踏むと，実COPは目標ZMPよりも前に移動する．その結果，ロボットを後傾させようとする床反力モーメントが目標ZMPまわりに発生し，ロボットは後傾しようとする．以降，ロボットを傾けようとする床反力モーメントを，転倒力モーメントと呼ぶ．

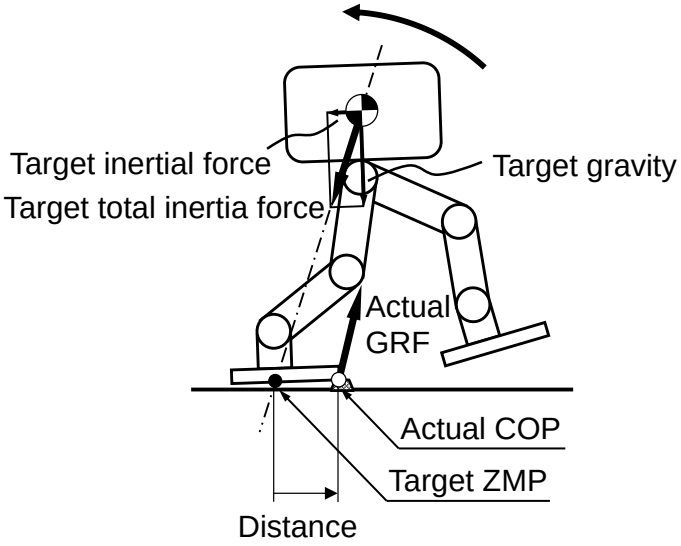


Fig.3.7 Imbalance during walking

転倒力モーメントをM^{tip}（前方向成分:M_x^{tip}，左方向成分:M_y^{tip}，鉛直成分:0），目標ZMPを始点とし実COPを終点とするベクトル（実COPと目標ZMPの差ベクトル）をD（前方向成分:D_x，左方向成分D_y:，鉛直成分:0），実鉛直並進床反力ベクトル（水平成分が0で，鉛直成分が床反力の並進力鉛直成分に一致する並進力ベクトル）をF^{vert}（前方向成分:0，左方向成分:0，鉛直成分:F_z^{vert}）とすると，M^{tip}は，次式のようにDとF^{vert}の外積となる．

$$M^{tip} = D \times F^{vert} \tag{3.1}$$

したがって，M_x^{tip} と M_y^{tip} は，次のようになる．

$$M_x^{tip} = D_y F_z^{vert} \tag{3.2}$$

$$M_y^{tip} = -D_x F_z^{vert} \tag{3.3}$$

これらの式より明らかなように，目標歩容の床反力の並進力鉛直成分F_z^{vert}がほぼ一定であるならば，転倒力モーメントは，実COPと目標ZMPとの距離にほぼ比例する．

ところで，想定していない突起などによって理想歩行状態から逸脱しても，Fig.3.8に示す

ように，実総慣性力と実床反力は，作用線が一致し，大きさが同じで，向きが互いに逆であり，実 ZMP と実 COP は一致する．この時の現象をより詳細に説明すると，例えば想定していない突起を踏んだ場合，実ロボットの関節角が理想目標歩容の関節角に追従し続けていても，実ロボットのグローバルな運動（具体的には，例えば，グローバル座標系上での上体の位置・姿勢の運動で代表される）には，目標歩容の運動に対して相対的に，ある点P（瞬間回転中心．この場合には，突起の位置）を中心に回転するような上体傾き角加速度偏差（以降，$\dot{\omega}^{err}_{incl_body}$と表記する）が生じる．この角加速度偏差によって実総慣性力が変化し，実 ZMP が実 COP に一致する．言い換えると，実 ZMP が実 COP に一致するように，実ロボット全体を回転させる上体傾き角加速度偏差$\dot{\omega}^{err}_{incl_body}$ が発生する．点Pまわりのロボット全体のイナーシャをI^{tip}とし，ロボットの関節角の運動によって発生する点Pまわりのイナーシャ変化やジャイロ効果などが無視できるものとすると，上体傾き角加速度偏差$\dot{\omega}^{err}_{incl_body}$は，近似的に次式によって求められる．

$$I^{tip}\dot{\omega}^{err}_{incl_body} = M^{tip} \tag{3.4}$$

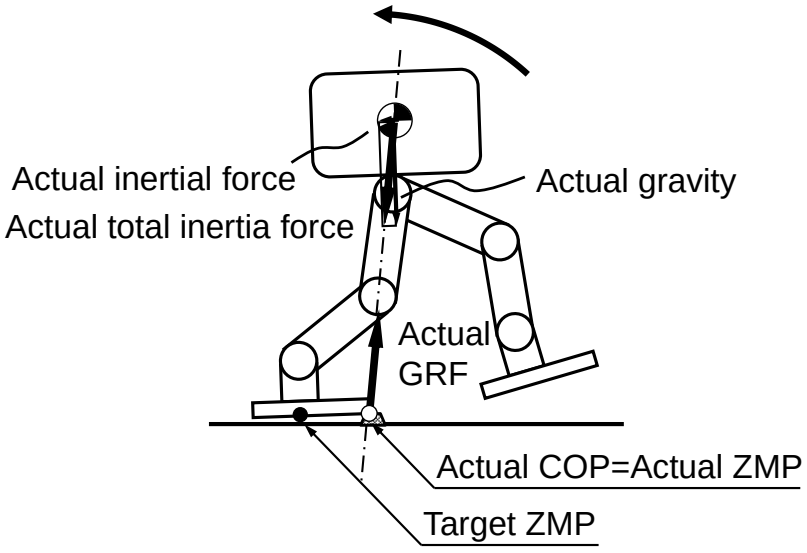


Fig.3.8 Stepping on stone

3.4 まとめ

本章では，まず，動力学に関する基本的な用語を定義した．次いで，剛体リンクから成り，理想目標歩容の関節角を目標値とする変位制御ロボットが，水平床面上を歩行するときに，以下の関係が成立することを示した．

1）理想歩行状態では，常に実 COP と目標 ZMP は一致する．

2）目標歩容の床反力の並進力鉛直成分F_z^{vert}がほぼ一定であるならば，転倒力モーメントは，実 COP と目標 ZMP との距離にほぼ比例する．

3）理想状態から実ロボットの姿勢が傾き始めるときの上体角加速度偏差は，転倒力モーメントに比例する．

すなわち，目標 ZMP と実 COP との差が，理想状態から実ロボットの姿勢が傾く原因であると言える．本論文で提案する姿勢制御手法は，逆に，この差を積極的に操作する（実 COP と目標 ZMP を操作する）ことによって，姿勢を回復させるものである．

第 4 章. 自在歩行歩容生成

第４章. 自在歩行歩容生成

4.1 はじめに

本章では，リアルタイムに自在に歩行するための，単純モデルを用いた近似歩容生成手法を提案する．本章で扱う歩容は，動バランスを考える上で，全体重心鉛直加速度の変動が無視できる歩容である．走行など全体重心鉛直加速度の変動が激しい歩容を生成する手法に関しては，次章で述べる．本章の手法で生成される歩容は，上体姿勢が常に鉛直に維持される歩容である．

緒論で述べたように，モデルZMP制御（仮想外力によって，目標歩容の総慣性力と床反力のバランスを崩すことで姿勢を安定化する制御）を考慮して，本章で提案する近似歩容生成手法は，時間関数で設定された足部軌道とZMP軌道とに基づいて順動力学モデルによって上体運動を生成する手法とする．このような手法では，実際のロボットを目標歩容に追従させる際の復元力余裕が，前後または左右方向に偏りがないようにするために，支持多角形の中央付近を通るように目標ZMP軌道を設定し，目標ZMPを満足するように上体の水平運動が決定される．しかし，ZMPは，瞬間的な動バランスを表現するものであり，目標歩容の継続性（具体的には上体水平位置が支持多角形から遠くに離れ過ぎないこと）を保証するものではない．

歩容の継続性をリアルタイムに保証するために，ロボットの重心（または上体）の水平運動を高さが一定の線形倒立振子モデルで表し，現在時刻から生成される歩容（以降，今回歩容と呼ぶ．今回歩容の区間は，1歩とは限らない.）の終端条件を設定して，これを満足するように，目標ZMP（倒立振子の支点に相当）のパターンを決定あるいは修正する手法が多く提案されている[8]～[12]．しかし，これらの手法では，目標ZMP軌道が大きく変動する傾向があったり，歩容境界において目標ZMPや重心位置・速度に不連続が生じたり，スラロームなどの多様な歩行に対して継続性が保証できる適切な終端条件を設定することが困難であったりする．

これらの問題を解決するために，本章では，今回歩容の後に続く定常歩容（具体的には連続で周期的な旋回歩容）を暫定的に設定し，生成される歩容が定常歩容に漸近するように，今回歩容の目標 ZMP 軌道の関数パラメータ値を決定する手法を提案する．本手法では，上体運動に対応する倒立振子の運動を，”発散成分”と”収束成分”に分解し，今回歩容の終端発散成分のみを定常歩容の初期発散成分に一致させることによって，終端条件を緩和しつつ，今回歩容を定常歩容に漸近させる．

また，本章では，近似精度が高くかつ挙動予測が容易な動力学モデルとして，高さが一定の倒立振子質点に，支持脚/遊脚の振りによる反力を考慮するための支持脚/遊脚質点を加えた 3 質点モデルを提案する．なお，J. H. Park ら[22]は，線形倒立振子に加えて，脚に作用する重力の影響を考慮したモデルを提案している．

本章で提案するこれらの手法により，高速歩行や急激な運動変化を伴う歩行などに対しても，動バランスが良くかつ継続性が保証された歩容を，リアルタイムに自在に生成することが可能となる．

以下，4.2 節では，歩行歩容生成システムの概要を説明する．次いで，4.3 節において，単

純モデルの詳細と，この運動の挙動解析手法を説明し，さらに 4.4 節において，本モデルを用いた近似歩容生成手法を説明する．4.5 節では，シミュレーションにより本手法の有効性を示し，最後に 4.6 節において，本章をまとめる．

4.2 歩行歩容生成システム

Fig.1.1 に示したように，歩容生成システムは，近似歩容生成部とフルモデル補正部から成り，さらに，近似歩容生成部は，歩容パラメータ決定部，単純モデル歩容生成部および幾何学的写像部とから成るものとする．

本章では，単純モデル歩容は，目標 ZMP 軌道，両足部の位置・姿勢角の軌道および単純モデルの軌道の組で表されるものとする．また，幾何学的写像部の出力である近似歩容は，目標 ZMP 軌道，両足部の位置・姿勢角の軌道および上体位置・姿勢角の軌道の組で表されるものとする．近似歩容における目標 ZMP 軌道と両足部の位置・姿勢角の軌道は，単純モデル歩容におけるそれぞれの軌道と同一である．

歩容の瞬時値を算出するために必要な軌道やパターンは，すべてパラメータで表現されるものとし，これらのパラメータを歩容パラメータと定義する．後述するように，一歩の時間は複数の区間に分割され，目標 ZMP などは，区間の境界を折れ点とする折れ線で表されるが，区間の境界時刻も歩容パラメータである．

任意の時刻からの歩容変更を可能にするために，シナリオ作成と歩容パラメータ決定も，制御周期毎に実行されるものとする．したがって，歩容の切り換わり目に近づくにつれ，今回歩容の区間は，徐々に短くなっていく．

幾何学的写像部では，単純モデル歩容の両足部の位置･姿勢角と単純モデルの変位を基に，以下のように，上体位置・姿勢角が決定されるものとする．（ASIMO の実験機は，片脚あたり６自由度であるので，上体の位置・姿勢角と両足部の位置・姿勢角が与えられれば，脚のすべての関節角度が，キネマティクス演算によって解析的に求められる.）

1) 近似歩容の上体姿勢は，常に鉛直姿勢に決定される．
2) 上体水平位置は，上体に固定された代表点の水平位置と，倒立振子質点の水平位置が一致するように決定される．
3) 上体鉛直位置は，折れ線状の全体重心鉛直加速度パターンを基に積分によって全体重心鉛直位置を算出し，単純モデルの重心鉛直位置と写像用モデルの重心鉛直位置が一致するように決定する．なお，全体重心鉛直加速度パターンは，関節角度が適切になるように，5.4.1 節 STEPb3 のように決定される．

本章では，フルモデル補正に関しては，簡易型の補正手法を示し，フルモデル補正によって最終的に得られる歩容に対しても，提案する単純モデルを用いた歩容生成手法による動力学的誤差が，線形倒立振子だけの 1 質点モデルを用いた場合よりも低減されることを示す．

4.3 動力学モデル

4.3.1 3 質点モデル

本節では，Fig.4.1 に示すように，倒立振子質点，支持脚足部質点および遊脚足部質点から成る 3 質点モデルを提案する．この動力学モデルは，上体を鉛直（または，所定の姿勢）に維持した歩行に対応するモデルであり，以下のように設定される．

a．倒立振子は，高さ一定の（鉛直加速度が 0 の）線形倒立振子とする．
b．倒立振子質点の水平位置は，上体に固定された代表点の水平位置を表す．
c．支持脚足部質点は，支持脚足首中心に設定される．遊脚足部質点も同様に設定される．
d．各質点間には，脚の伸び切りなどを考慮した幾何学的な拘束が存在しない．
e．サジタル面上の運動とラテラル面上の運動は独立している．

以下では，サジタル面上の運動に関して説明する．ここで，本章で使用する主な表記を列挙する．

$m_{sup/swg}$: 支持/遊脚足部質点質量
m_{pend}: 倒立振子質点質量
m_{total}: ロボット総質量($= m_{pend} + m_{sup} + m_{swg}$)
m_{feet} : 両脚足部質量($= m_{sup} + m_{swg}$)
$x_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部質点水平位置
$z_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部質点鉛直位置
x_{pend}: 倒立振子水平位置
h: 倒立振子の高さ（一定値）
$\ddot{z}_{cog}$: ロボット全体重心鉛直加速度
x_{pend}^{ZMP}: 倒立振子支点水平位置
x_{total}^{ZMP}: 総合 ZMP（3 質点モデルの ZMP）
g: 重力加速度定数

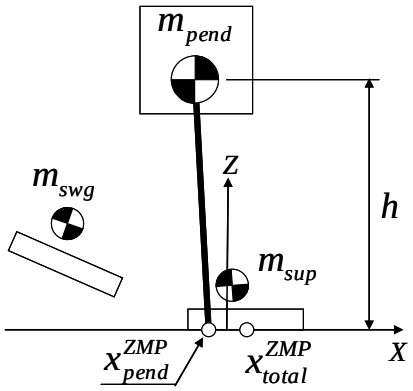


Fig.4.1 Dynamics model with three masses

なお，本章では，目標 ZMP とは，総合 ZMP（3 質点モデルの ZMP）x_{total}^{ZMP}の目標値を意味するものとする．

以降のモデルの説明においては，床面上に設定されたある点Pまわりの力のモーメントに関して議論する．点Pの軌道は，目標 ZMP と同様に，パラメータ表現され，歩容パラメータとして設定されるものとする．点Pの水平/鉛直位置をx_P, z_Pとする．

脚質点によって点Pまわりに発生する床反力モーメントを，脚質点モーメントM_{feet}と呼ぶ．M_{feet}は，次式で求められる．

$$\begin{aligned} M_{feet} = & -m_{sup}(x_{sup} - x_p)(g + \ddot{z}_{sup}) \\ & + m_{sup}(\ddot{x}_{sup})(z_{sup} - z_p) \\ & - m_{swg}(x_{swg} - x_p)(g + \ddot{z}_{swg}) \\ & + m_{swg}(\ddot{x}_{swg})(z_{swg} - z_p) \end{aligned} \tag{4.1}$$

倒立振子によって点Pまわりに発生する床反力モーメントを，倒立振子モーメントM_{pend}と呼ぶ．M_{pend}と支点水平位置x_{pend}^{ZMP}の間には，次式の関係が成立する．

$$M_{pend} = -m_{pend} g (x_{pend}^{ZMP} - x_p) \tag{4.2}$$

ここで式(4.2)を参考に，次式を満足するx_{feet}^{ZMP}を，脚質点 ZMP と定義する．

$$M_{feet} = -m_{feet} g (x_{feet}^{ZMP} - x_p) \tag{4.3}$$

補足すると，上式で定義される脚質点 ZMP は，厳密な意味では脚質点によって発生する慣性力と重力の合力モーメントが 0 となる床面上の点とは異なる．

3 質点モデルによって点Pまわりに発生する床反力モーメントを，総合床反力モーメントM_{total}と呼ぶ．M_{total}は，次式で求められる．

$$M_{total} = M_{feet} + M_{pend} \tag{4.4}$$

一方，総合床反力モーメントとx_{total}^{ZMP}には，次式の関係が成立する．

$$M_{total} = -m_{total}(g + \ddot{z}_{cog})(x_{total}^{ZMP} - x_p) \tag{4.5}$$

式(4.2)～(4.5)より，次の関係式を得る．

$$(x_{pend}^{ZMP} - x_p) = \frac{m_{total}}{m_{pend}}(x_{total}^{ZMP} - x_p) - \frac{m_{feet}}{m_{pend}}(x_{feet}^{ZMP} - x_p) + \frac{\ddot{z}_{cog}}{g}\frac{m_{total}}{m_{pend}}(x_{total}^{ZMP} - x_p) \tag{4.6}$$

上式において，左辺のx_pと右辺第１項と第２項のx_pは，打ち消し合うので，上式は次式に変形される．

$$x_{pend}^{ZMP} = \frac{m_{total}}{m_{pend}}\left\{x_{total}^{ZMP} + \frac{\ddot{z}_{cog}}{g}(x_{total}^{ZMP} - x_p)\right\} - \frac{m_{feet}}{m_{pend}}(x_{feet}^{ZMP}) \tag{4.6'}$$

ここで，点Pは，目標 ZMP またはその近傍に設定されるものとし，また，次式が成立するものとする．

$$\ddot{z}_{cog} << g \tag{4.7}$$

これらの前提の下で，式(4.6’)において中括弧内の第 2 項を無視すると（すなわち，本項が中括弧内の第 1 項である目標 ZMP の誤差として許容できるものとすると)，次の近似式を得る．

$$x_{pend}^{ZMP} = \frac{m_{total}}{m_{pend}}x_{total}^{ZMP} - \frac{m_{feet}}{m_{pend}}x_{feet}^{ZMP} \tag{4.8}$$

後述するように，歩容生成においては，目標 ZMP 軌道が修正される場合がある．この場合，動力学的精度の観点からは，目標 ZMP 軌道の修正に伴って，点Pの軌道も，修正された目標 ZMP 軌道に一致するように変更することが望ましい．ただし，式(4.7)が成立していれば，計算負荷の増加を防ぐ目的から，点Pの軌道を変更しないでおいても，実用上，問題はない．

一方，線形倒立振子の質点の運動と支点の間には，次式の関係が成立する．

$$\ddot{x}_{pend} = \frac{g}{h}(x_{pend} - x_{pend}^{ZMP}) \tag{4.9}$$

近似歩容生成部では，各瞬間において，上記モデルを用いて，以下のように歩容の瞬時値が算出される．

STEPa1) 歩容パラメータを基に，各瞬間の足部位置・姿勢角，目標 ZMP および点Pの位置を算出する．

STEPa2) 式(4.1)によりM_{feet}を求める．

STEPa3) 式(4.3)によりx_{feet}^{ZMP}を求める．

STEPa4）目標 ZMP とx_{feet}^{ZMP}を式(4.8)に代入してx_{pend}^{ZMP}を求める．

STEPa5）式(4.9)により倒立振子の加速度を求め，これを積分して倒立振子の水平位置と速度を求める．

STEPa6）幾何学的写像部にて，倒立振子の水平位置に対応した上体水平位置を求めると共に，上体鉛直加速度に関する歩容パラメータを基に上体鉛直位置を求める．

なお，3 質点モデルの各パラメータは，3 質点モデルの静特性と動特性が，それぞれフルモデルの静特性と動特性に極力一致するように設定される．具体的には，倒立振子質点質量m_{pend}とロボット総質量m_{total}との比m_{pend}/m_{total}は，フルモデルにおいて，直立姿勢から上体を微小量だけ水平方向に平行移動させた時の全体重心の移動量と上体の移動量との比に一致するように設定される．さらに，直立姿勢時での 3 質点モデルとフルモデルの全体重心水平位置が一致するように，上体に固定される代表点（上体に固定された，ある座標系から見た代表点の座標）が決定される．さらに，直立姿勢から上体を水平方向に平行に加速させた瞬間の上体加速度とこれに起因する ZMP の摂動量との関係が,3 質点モデルとフルモデルとにおいて一致するように，倒立振子の高さhが設定される．

4.3.2 発散成分と収束成分

従来，今回歩容の終端条件には，倒立振子の位置と速度が広く用いられてきた．本章の単純モデル歩容生成手法では，倒立振子の運動を，発散成分と収束成分に分離し，発散成分のみを終端条件とすることで，終端条件を緩和する．本節では，発散成分と収束成分を定義し，その性質を議論する．

倒立振子の正の固有値をλ_0とする．λ_0は次式によって得られる．

$$\lambda_0 = \sqrt{g/h} \tag{4.10}$$

ここで，次式のように，pとqを決める．

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/\lambda_0 \\ 1 & 1/\lambda_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{pend} \\ \dot{x}_{pend} \end{pmatrix} \tag{4.11}$$

pとqを用いることによって，式(4.9)は，次式に変換される．

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_0 & 0 \\ 0 & \lambda_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda_0 \\ -\lambda_0 \end{pmatrix} x_{pend}^{ZMP} \tag{4.12}$$

x_{pend}^{ZMP}が一定値$x_{pend}^{ZMP_c}$である場合，一般解は，

$$\begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 e^{-\lambda_0 t} + x_{pend}^{ZMP_c} \\ C_2 e^{\lambda_0 t} + x_{pend}^{ZMP_c} \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

である．ただし，C_1, C_2は，任意の定数である．すなわち，時定数$1/\lambda_0$で，pは倒立振子支点位置$x_{pend}^{ZMP_c}$に収束し，qは発散する．この性質からpを収束成分，qを発散成分と呼ぶ．このように，収束成分は自然に支点位置に収束するので，終端条件としては，収束成分は無視し，発散成分のみを考慮することとする．

式(4.8)(4.12)より，次式を得る．

$$q(t) = e^{\lambda_0 t} q(0) - \frac{m_{total}}{m_{pend}} \lambda_0 e^{\lambda_0 t} \int_0^t e^{-\lambda_0 \tau} x_{total}^{ZMP}(\tau) d\tau + \frac{m_{feet}}{m_{pend}} \lambda_0 e^{\lambda_0 t} \int_0^t e^{-\lambda_0 \tau} x_{feet}^{ZMP}(\tau) d\tau \tag{4.14}$$

すなわち，発散成分は，発散成分初期値の項，目標 ZMP の項，および脚質点 ZMP の項から成る．また，任意の時刻の発散成分は，その後，目標 ZMP と脚質点 ZMP が共に 0 であるならば，$T_a (T_a \geq 0)$秒後に，$e^{\lambda_0 T_a}$倍となることがわかる．

4.3.3 目標 ZMP 軌道が発散成分に及ぼす影響

本章では，目標 ZMP 軌道は，Fig.4.2 のように，折れ線状に設定されると仮定する．すなわち，1 歩の期間は，第$0,1,\ldots,N-1$期間に分割され，目標 ZMP 軌道は，各期間において等速直線運動をするものとする．このように，各期間における軌道が多項式である場合，式(4.14)の目標 ZMP の項は，以下に示すように，解析的に求めることができる．

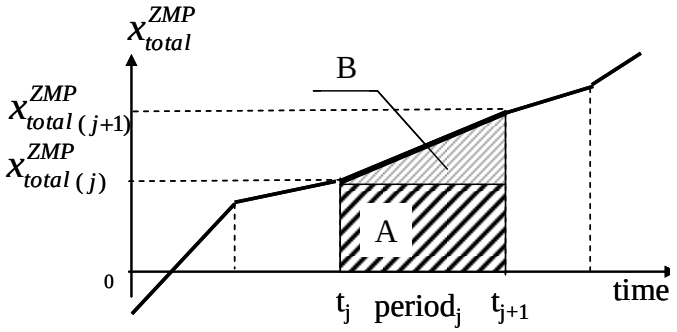


Fig.4.2 ZMP trajectory

時刻 0 から時間Tの期間において，目標 ZMP が，次式のように時刻tのn乗(nは非負の整数)である場合に，この期間の目標 ZMP が時刻Tでの発散成分に及ぼす影響を$R(T,n)$とする．

$$x_{total}^{ZMP}(t) = t^n \tag{4.15}$$

式(4.14)(4.15)と二項定理を用いることにより，$R(T,n)$は，次のようになる．

$$
\begin{aligned}
R(T,n) &= -\frac{m_{total}}{m_{pend}}\lambda_0 e^{\lambda_0 T}\int_0^T e^{-\lambda_0\tau}\tau^n d\tau \\
&= -\frac{m_{total}}{m_{pend}}\lambda_0 e^{\lambda_0 T}\left(\int_0^\infty e^{-\lambda_0\tau}\tau^n d\tau - \int_0^\infty e^{-\lambda_0(\tau+T)}(\tau+T)^n d\tau\right) \\
&= -\frac{m_{total}}{m_{pend}}\lambda_0 e^{\lambda_0 T}\left(\int_0^\infty e^{-\lambda_0\tau}\tau^n d\tau - e^{-\lambda_0 T}\sum_{m=0}^{n}\left({}_nC_m T^{(n-m)}\int_0^\infty e^{-\lambda_0\tau}\tau^m d\tau\right)\right)
\end{aligned}
\tag{4.16}
$$

上式３行目の左の積分部分は，λ_0をsに置き換えると t^nのラプラス変換になっている．t^nをラプラス変換すると $n!\,s^{-(n+1)}$ になるので，上式３行目の左側の積分部分は，$n!\,\lambda_0{}^{-(n+1)}$となる．同様に，上式３行目の右側の積分部分は，$m!\,\lambda_0{}^{-(m+1)}$となる．よって，次式が得られる．

$$
\begin{aligned}
R(T,n) &= -\frac{m_{total}}{m_{pend}}\lambda_0 e^{\lambda_0 T}\left(n!\,\lambda_0^{-(n+1)} - e^{-\lambda_0 T}\sum_{m=0}^{n}\left({}_nC_m T^{(n-m)} m!\,\lambda_0^{-(m+1)}\right)\right) \\
&= -\frac{m_{total}}{m_{pend}} e^{\lambda_0 T}\left(n!\,\lambda_0^{-n} - e^{-\lambda_0 T}\sum_{m=0}^{n}\left({}_nC_m T^{(n-m)} m!\,\lambda_0^{-m}\right)\right) \\
&= -\frac{m_{total}}{m_{pend}} e^{\lambda_0 T}\left(n!\,\lambda_0^{-n} - e^{-\lambda_0 T}\sum_{m=0}^{n}{}_nP_m T^{(n-m)}\lambda_0^{-m}\right)
\end{aligned}
\tag{4.17}
$$

Fig.4.2 の目標 ZMP 軌道において，初期時刻を 0，終端時刻をt_Eとし，第j期間の終端時刻をt_{j+1}，その時の目標 ZMP を$x_{total(j+1)}^{ZMP}$とする．第j期間で発生する発散成分は，矩形領域(Fig.4.2 area A)による発散成分と三角形領域(Fig.4.2 area B)による発散成分の和で表現できるので，第j期間の目標 ZMP 軌道が歩容終端時刻t_Eでの発散成分に及ぼす影響q_j^{ZMP}は，次のようになる．

$$
\begin{aligned}
q_j^{ZMP} &= e^{\lambda_0(t_E - t_{j+1})} x_{total(j)}^{ZMP} R(t_{j+1}-t_j,0) \\
&\quad + e^{\lambda_0(t_E - t_{j+1})}\frac{x_{total(j+1)}^{ZMP} - x_{total(j)}^{ZMP}}{(t_{j+1}-t_j)} R(t_{j+1}-t_j,1)
\end{aligned}
\tag{4.18}
$$

よって，全期間の目標 ZMP 軌道が時刻t_Eでの発散成分に及ぼす影響q^{ZMP}は，次式のようになる．

$$
q^{ZMP} = \sum_{j=0}^{N-1} q_j^{ZMP} \tag{4.19}
$$

式(4.14)(4.19)より，歩容終端時刻t_Eでの発散成分は，次のようになる．

$$
\begin{aligned}
q(t_E) &= e^{\lambda_0 t_E} q(0) + q^{ZMP} \\
&\quad + \frac{m_{feet}}{m_{pend}}\lambda_0 e^{\lambda_0 t_E}\int_0^{t_E} e^{-\lambda_0\tau} x_{feet}^{ZMP}(\tau) d\tau
\end{aligned}
\tag{4.20}
$$

なお，上記の議論は連続系で行ったが，実装上は，離散系で記述した.

4.4 近似歩容生成手法

4.4.1 近似歩容生成の全体フロー

提案する近似歩容生成手法の全体フローについて，その概要を以下に説明する.

まず，歩容パラメータ決定部において，以下の STEPb1 から STEPb6 まで実行することにより，今回歩容の足部軌道パラメータと ZMP 軌道パラメータを決定する.

STEPb1）移動指示に応じて，今回歩容とそれに続く定常歩容の目標着地位置と歩行周期を決定する．定常歩容は，Fig.4.3 に示すように，2 歩の歩容（以降，1 歩目を第 1 定常歩容，2 歩目を第 2 定常歩容と呼ぶ）を交互に繰り返し生成することで，グローバル座標系上での移動量を除き，連続で周期的な運動が生成される歩容である．すなわち，定常歩容の初期状態と終端状態は，グローバル座標系上での位置と向きを除き，一致しなければならない．以降，この条件を，定常歩容の連続性の条件と呼ぶ．なお，定常歩容は，今回歩容の終端条件を決定するための暫定的な歩容であり，実際のロボットの制御において，目標値として生成される必要はない.

STEPb2）定常歩容と今回歩容の足部軌道パラメータを設定する.

STEPb3）定常歩容と今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを設定する.前述のように，目標 ZMP 軌道は，各区間の境界時刻とその時の目標 ZMP 位置によってパラメータ表現されるが，実際のロボットを目標歩容に追従させる際の復元力余裕が，前後または左右方向に偏りがないようにするために，支持多角形の中央付近を通るように設定される.

STEPb4）定常歩容の初期発散成分と終端発散成分が一致するように，定常歩容の初期発散成分を決定する.

STEPb5）今回歩容パラメータを基に，今回歩容の終端発散成分を算出し，さらに，今回歩容と定常歩容の境界での発散成分の差を算出する.

STEPb6）発散成分の差がゼロになるように，今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する.

次いで，単純モデル歩容生成部において，このように設計された今回歩容の足部軌道パラメータと ZMP 軌道パラメータを基に，逐次，式(4.8)(4.9)により倒立振子質点の位置・速度を算出する.

最後に，幾何学的写像部において，倒立振子質点の位置に対応する上体位置を算出し，これと足部位置・姿勢角を基に，逆運動学を用いて脚部の関節角度を算出する.

以下では，STEPb4 から STEPb6 について，詳細を説明する.

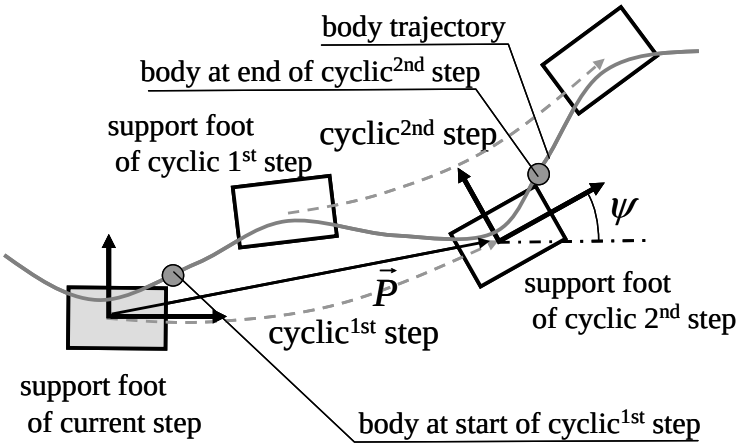


Fig.4.3 Cyclic gait

4.4.2 定常歩容の初期発散成分の算出

本節では，定常歩容の初期発散成分の算出法について説明する．以下に，本節で使用する表記を列挙する．

t： 時刻（定常歩容の初期時刻を 0 とする.）
T_{cyc}: 定常歩容の歩行周期（第 1，第 2 定常歩容の歩行周期の和）
$\vec{P}$: 今回歩容の支持脚座標系から見た第 2 定常歩容の支持脚座標系原点位置
ψ: 今回歩容の支持脚座標系から見た第 2 定常歩容の支持脚座標系の向き(鉛直軸まわりの回転角度)
$\vec{q}_{cyc}(t)$:今回歩容の支持脚座標系から見た定常歩容の時刻tでの発散成分
$\vec{q}_{cyc}^{coord2}(t)$:第 2 定常歩容の支持脚座標系から見た定常歩容の時刻tでの発散成分

鉛直軸まわりの回転角ψの回転行列を$R_z(\psi)$と表すと，$\vec{q}_{cyc}(T_{cyc})$は，次式によって$\vec{q}_{cyc}^{coord2}(T_{cyc})$に座標変換される.

$$\vec{q}_{cyc}^{coord2}(T_{cyc}) = R_z(-\psi)\left\{\vec{q}_{cyc}(T_{cyc}) - \vec{P}\right\} \tag{4.21}$$

一方，式(4.20)から，次式の関係が得られる．ここで，右辺第 2 項と第 3 項の値は，それぞれ，定常歩容の目標 ZMP 軌道と脚質点 ZMP 軌道が発散成分に及ぼす影響である．ただし，これらは,今回歩容の支持脚座標系から見た値に座標変換されたものである.(右辺第2項は，4.3.3 節で述べた方法によって求められる.)

$$\vec{q}_{cyc}(T_{cyc}) = e^{\lambda_0 T_{cyc}}\vec{q}_{cyc}(0) + \vec{q}_{cyc}^{ZMP} + \vec{q}_{cyc}^{feet} \tag{4.22}$$

ところで，定常歩容の連続性の条件から，次式が成立する.

$$\vec{q}_{cyc}^{coord2}(T_{cyc}) = \vec{q}_{cyc}(0) \tag{4.23}$$

式(4.21)(4.22)(4.23)より，定常歩容の初期発散成分$\vec{q}_{cyc}(0)$は，次式のようになる．

$$\vec{q}_{cyc}(0) = \left(e^{\lambda_0 T_{cyc}} I - R_z(\psi)\right)^{-1}\left(\vec{P} - \vec{q}_{cyc}^{ZMP} - \vec{q}_{cyc}^{feet}\right) \tag{4.24}$$

4.4.3 今回歩容の ZMP 軌道パラメータの修正

本節では，今回歩容終端での発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させるように，今回歩容の ZMP 軌道パラメータを修正する手法について述べる．

STEPc1) まず，今回歩容パラメータを基に，式(4.20)を用いて今回歩容の終端発散成分$\vec{q}_{curr}(T_{curr})$を求める．

STEPc2) 次式により，定常歩容の初期発散成分と今回歩容の終端発散成分の差$\vec{q}_{diff}$を求める．

$$\vec{q}_{diff} = \vec{q}_{cyc}(0) - \vec{q}_{curr}(T_{curr}) \tag{4.25}$$

STEPc3) 目標 ZMP 軌道を修正するために，Fig.4.4 に示す単位高さの台形状の軌道$x_{unit}^{ZMP}(t)$を準備する．ただし，台形の折れ点の時刻は，今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータとして設定された区間境界時刻の中から選ぶ．また，片脚のつま先だけが接地している期間(Fig.4.4 の最後の区間)のように，ZMP 位置の制約が厳しい区間が有る場合，その区間を避けるように台形を設定する．これによって，ZMP の制約を考慮した修正が容易となる．

STEPc4) この単位高さの台形状の目標 ZMP 軌道が今回歩容終端での発散成分に及ぼす影響q_{unit}を，4.3.3 節で述べた方法により求める．さらに，次式により，補正台形の高さベクトル$\vec{x}_{add}^{ZMP}$を求める．

$$\vec{X}_{add}^{ZMP} = \vec{q}_{diff} / q_{unit} \tag{4.26}$$

STEPc5) 今回歩容の目標 ZMP 軌道に，$x_{unit}^{ZMP}(t)\vec{x}_{add}^{ZMP}$ を加えることによって，この軌道を修正する．修正された目標 ZMP 軌道は，Fig.4.4 に示すように，元の目標 ZMP 軌道パラメータのうちの，いくつかの区間境界時刻での ZMP 位置パラメータ値に，$\vec{x}_{add}^{ZMP}$を加えたものになる．すなわち，今回歩容の修正は，ZMP 軌道パラメータ（折れ点位置）のみを修正することで行うことができる．

以上のように今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させることによって，今回歩容は，定常歩容に漸近する．より詳細には，修正された今回歩容パラメータを基に今回歩容を生成した後に，その終端状態を初期状態として，定常歩容パラメータを基に歩

容を生成し続けると，倒立振子軌道は，定常歩容の倒立振子軌道に漸近する．

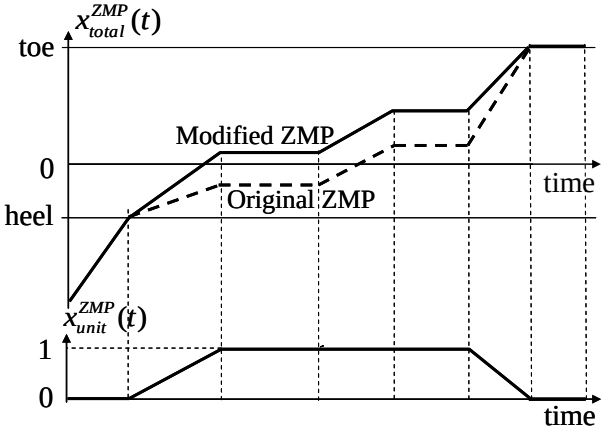


Fig.4.4 Unit trapezoid ZMP pattern

ところで，今回歩容と定常歩容の境界で倒立振子位置と速度の両方を一致させる方法では，ZMP が折れ線で表される場合，目標 ZMP 軌道の修正のために，Fig.4.5 に示すふたつの台形から成る軌道のように，複数の操作パラメータにより表される軌道を準備する必要がある．この方法では，高速歩行から急停止や急旋回に移行する時など，急激に歩行動作を変更する時に，修正の変動幅が大きくなる傾向がある．これに比べ，発散成分のみを一致させる方法では，終端条件が緩和されるので，修正の変動幅を小さくすることができる．

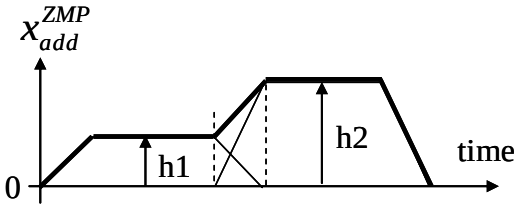


Fig.4.5 Trapezoid ZMP pattern with 2 peaks

なお，発散成分のみを一致させるためであっても，目標 ZMP 軌道が部分的に支持多角形から逸脱する場合には，Fig.4.5 のように複数の修正用台形軌道を用いても良い．それでも逸脱する場合には，歩容の着地位置や時間を変更しても良い．また，歩行停止時に有限時間で上体を静止させることを優先したい場合には，複数の修正用台形軌道を用いて，静止時刻における発散成分と収束成分の両方を，目標静止状態での倒立振子位置に一致させれば良い．この場合は，位置と速度を境界条件として用いることと等価である．

4.5 歩容生成シミュレーション

本節では，人間型ロボット ASIMO Ver.2（質量 54[kg]）[21]の詳細パラメータを基に，提案する近似歩容生成手法を用いて歩容生成のシミュレーションを行った結果を示す．なお，

本ロボットに対応する 3 質点モデルの上体質量比率（m_{pend}/m_{total}）は 0.82，倒立振子の高さhは 0.803[m]とし，制御周期は 5[ms]とした．

4.5.1 3 質点モデルの近似精度

Fig.4.6 に，4.05[km/h](歩幅 0.45[m]，歩行周期 0.4[s])の直線歩行時の動力学的誤差を示す．ここでの動力学的誤差とは，近似歩容の運動をフルモデルに行わせた場合に目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメントを，ZMP のずれに換算したものである．実線は，3 質点モデル，点線は，線形倒立振子だけの 1 質点モデルの場合である．なお，一点鎖線は，足部質点によって発生する床反力モーメントの ZMP 換算値を示す．

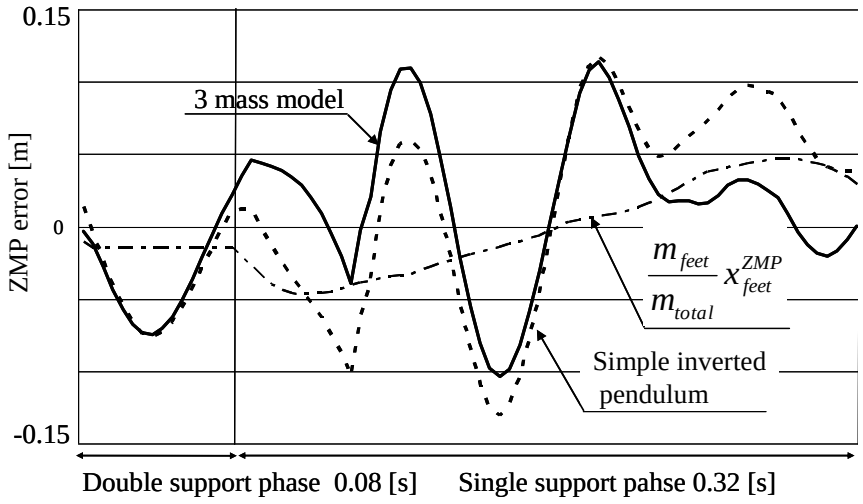


Fig.4.6 ZMP error of proposed model

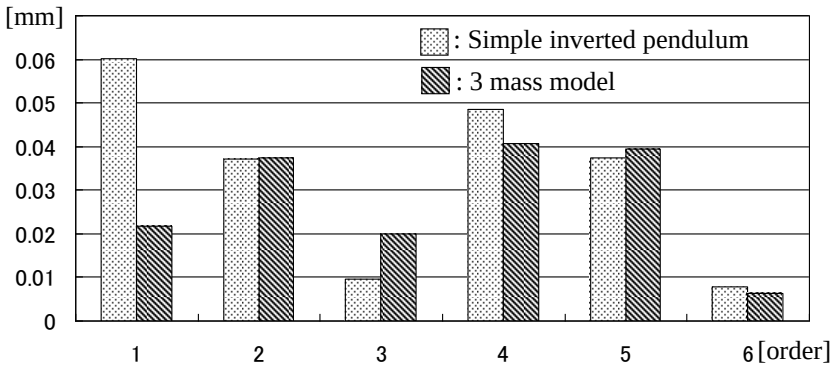


Fig.4.7 Frequency spectrum of ZMP error

上記 ZMP のずれの波形を，フーリエ級数展開を用いて周期 0.4[s]の基本波成分と高調波成分に分解することによって，Fig.4.7 が得られる．横軸が高調波の次数を表す．1 質点モデルの場合に比べて，3 質点モデルの場合，基本波成分が 1/2.8 倍に低減している．高調波成分は

少し大きくなっているが，この成分は，第６章に示すフルモデル補正手法によって低減できる．

Fig.4.8 は，第６章のフルモデル補正手法を歩行歩容用に簡素化したものである．図中のx_{body_offset}は，上体に固定された代表点の水平位置と倒立振子質点の水平位置を一致させるためのオフセットであり，倒立振子水平位置x_{pend}にx_{body_offset}が加えられることによって，近似歩容の上体水平位置が決定される．

本補正手法では，まず，近似歩容に対し，フルモデル上での ZMP 誤差（フルモデルから算出される ZMP と目標 ZMP の差）$x_{err}^{ZMP}(t)$を求める．次いで，ZMP 誤差を(−1)倍して，3 質点モデルの倒立振子部分と同一特性を持つ補正用倒立振子に入力し，補正用倒立振子の運動を単純モデル歩容に加えることで，補正された上体軌道$x_{body_mdfd}(t)$を得る．以上の補正によって，ZMP 誤差を打ち消すことができるが，このままでは，補正用倒立振子が発散するので，補正用倒立振子を安定化する制御則によってフィードバック量を決定し，補正用倒立振子に追加的に入力する．この結果，補正後の歩容の ZMP は，元々の目標 ZMP からフィードバック量分だけずれる．以降，このずれを$x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$と表記する．

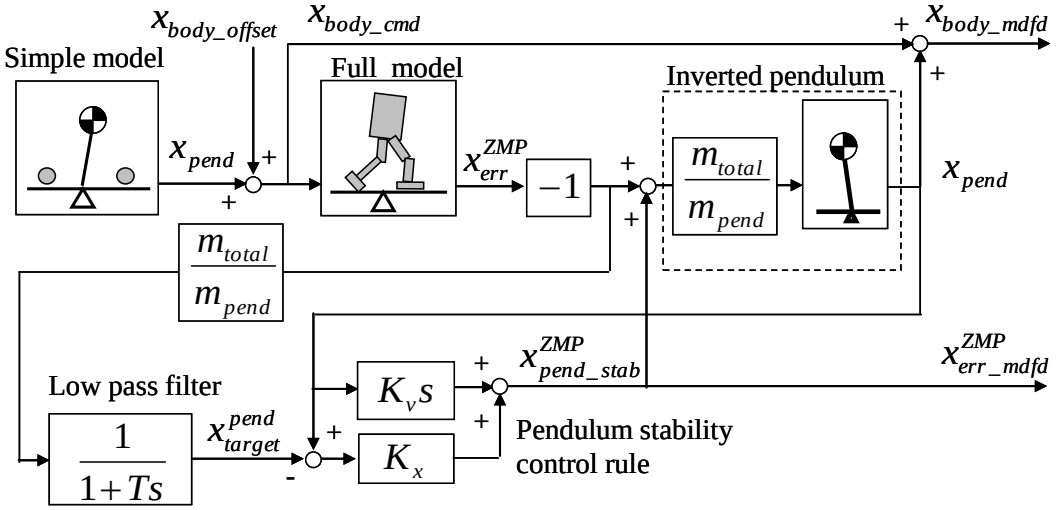


Fig.4.8 Full model compensation

経験的に得た設定値として，$K_x = 2.0 * (m_{pend}/m_{total}), K_v = 2.0 * (m_{pend}/m_{total})/\lambda_0$ ，$T = 2.0/\lambda_0$とすると，x_{err}^{ZMP}から$x_{err_mdfd}^{ZMP}$までの伝達関数は，次式のようになる．

$$\frac{x_{err_mdfd}^{ZMP}(s)}{x_{err}^{ZMP}(s)} = 3.0 \cdot \frac{\frac{s}{0.5 \cdot \lambda_0}}{\frac{s}{0.5 \cdot \lambda_0} + 1} \cdot \frac{1}{\frac{s}{1.0 \cdot \lambda_0} + 1} \tag{4.27}$$

すなわち，この伝達関数は，ゲイン 3.0 と，カットオフ角周波数$0.5 * \lambda_0$のローカットフィ

ルタと，カットオフ角周波数$1.0 * \lambda_0$のハイカットフィルタとの積となる．λ_0は 3.5[rad/s]，定常歩容の基本角周波数は 5.0π[rad/s]であるので,この補正によって基本波成分は,約 0.7 倍にしか低減されないが，第$n(n = 2,3,\ldots)$高調波成分は，約$0.7/n$倍に低減される．Fig.4.6 の波形をこの補正に通して得られる$x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$を，Fig.4.9 に示す．1 質点モデルの場合に比べて，3 質点モデルの場合には，ZMP 誤差のうちの基本波成分が少ないため（Fig4.7），$x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$が約 1/2 倍に低減している．

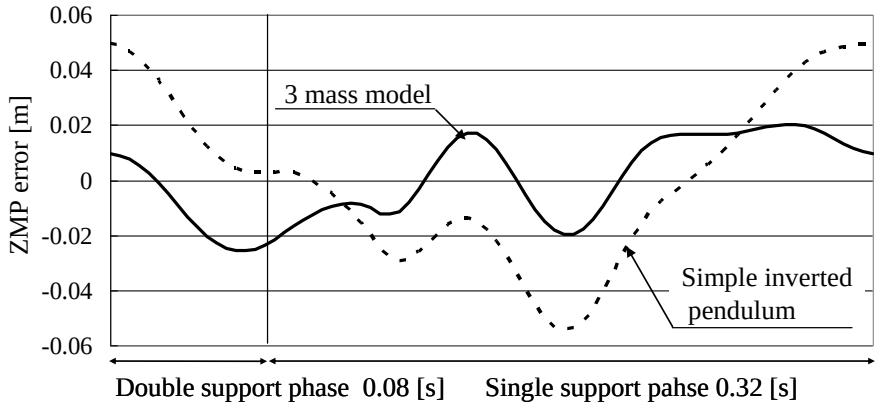


Fig.4.9 ZMP error after full model compensation

3 質点モデルを用いることによって，ASIMO においては，歩行周期 0.4～1.0[s]，歩幅 -0.27～0.45[m] の範囲で任意の直線歩行が実現されている．また，脚同士の干渉を回避するために，直線歩行よりは最高移動速度が低下するが，ほぼ同様の範囲で旋回歩行も可能となっている．これらの範囲の中では，歩幅が大きい程，また歩行周期が短い程，$x_{err_mdfd}^{ZMP}(t)$のピーク値は増大する傾向があり，上記の歩行例は，ほぼ最悪な場合となっている．しかし，図からわかるように，3 質点モデルを用いた場合には，ピーク値は十分小さく抑えられている．

4.5.2 発散成分による接続の効果

提案した発散成分による接続の効果を調べるために，Fig.4.10 に，高さ 1[m]の単純倒立振子を，0.1[m]オフセットした状態から直立静止状態に遷移させるための ZMP 軌道の設計例を示す．修正用 ZMP の発生期間は 0.35[s]である．位置と速度を接続する場合，倒立振子位置(a)は接続時刻で直立状態になるが，ZMP 軌道(e)の最大値は 0.58[m]となる．一方，発散成分を接続する場合には，倒立振子位置(b)は，無限時間掛けて収束していくが，ZMP 軌道(f)の最大値は 0.18[m]に低減される．なお，この場合，発散成分は(d)で示すように，接続時刻で目標発散成分 0[m]になっているが，収束成分(c)は，無限時間かけて 0[m]に漸近する．

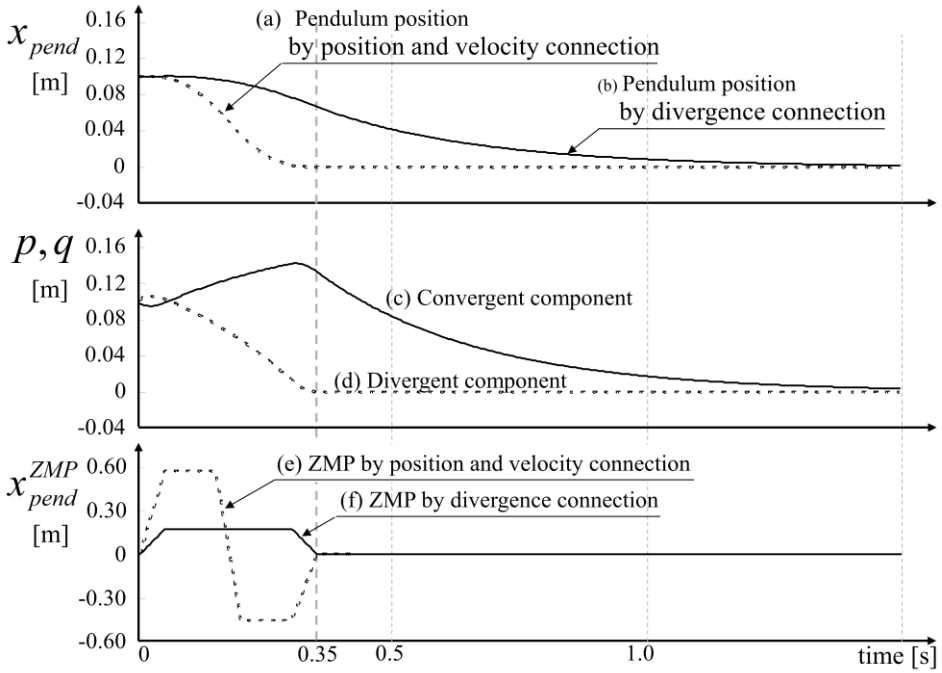


Fig.4.10 ZMP trajectory for connection

4.5.3 歩容生成例

Fig.4.11 は，1.0[km/h](歩幅 0.25[m]，歩行周期 0.90[s])の定常直線歩行から，3.0[km/h](歩幅 0.45[m]，歩行周期 0.54[s])の定常直線歩行へ，歩行速度を変更した場合の単純モデル歩容生成例である．左から 1 歩目は，1.0[km/h]の定常歩容である．2 歩目は，今回歩容であり，3 歩目，4 歩目は，3.0[km/h]の定常歩容である．縦軸は支持脚座標系で表されており，1 歩毎に座標系が切り換るので，軌道に不連続が生じているように見えるが，実際には連続している．

今回歩容の元のパラメータには，1 歩目の歩容パラメータの値が設定されている．Fig.4.11 より，今回歩容を 3.0[km/h]の定常歩容に漸近させるために，今回歩容の ZMP が後方に 0.03[m]修正され，上体が加速していることがわかる．このように，急峻な運動変化に対しても，提案した手法によって，ZMP 修正量は比較的小さく抑えられ，修正された ZMP 軌道は支持多角形から逸脱しにくくなる．

なお，今回歩容を生成した後に，改めて，今回歩容，第 1，第 2 定常歩容のパラメータそれぞれに，上記の 3 歩目，4 歩目，3 歩目の歩容パラメータの値を設定すると，今回歩容パラメータの修正量は 0 となる．

また Fig.4.12 に，提案した手法によって歩行開始から停止まで歩容を生成した時の，発散成分，収束成分，倒立振子質点の挙動を示す．歩行周期は 0.55[s]，最大速度は 3.0[km/h]である．倒立振子質点位置は，発散成分と収束成分の平均値になる．収束成分は ZMP 軌道に一次遅れで追従し，停止時には ZMP の真上に収束することがわかる．

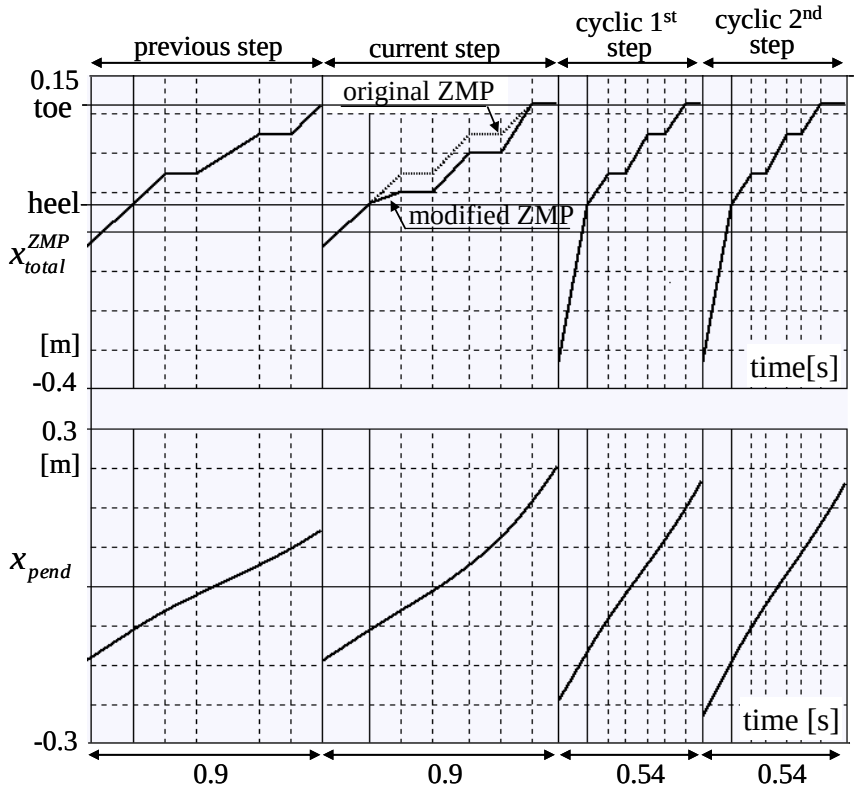


Fig.4.11 Acceleration from 1[km/h] to 3[km/h]

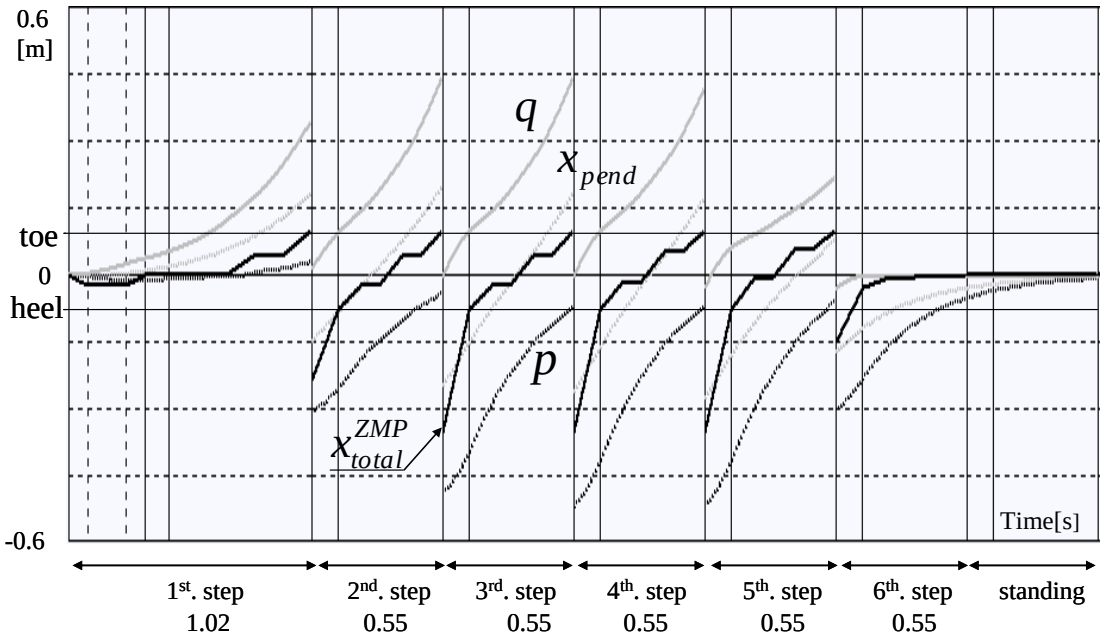


Fig.4.12 Divergent and convergent component during walking

4.6 まとめ

本章では，脚運動の影響を考慮しつつ，部分的に線形性を有する，線形倒立振子質点，支持脚足部質点および遊脚足部質点から成る 3 質点モデルを提案した．さらに，今回歩容に続く定常歩容を暫定的に設定し，今回歩容の終端発散成分が定常歩容の初期発散成分に一致するように，今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する歩容生成手法を提案した．本手法により，目標 ZMP 軌道の修正量は比較的小さく抑えられ，修正された ZMP 軌道は支持多角形から逸脱しにくくなると共に，今回歩容は定常歩容に漸近する．この結果，急激な運動変化を伴うような様々な歩行に対しても，動バランスが良くかつ継続性が保証された歩容が生成できるようになった．最後に，これらの手法の有効性を，歩行速度変更のシミュレーションにより示した．

第５章. 自在走行歩容生成

第５章. 自在走行歩容生成

5.1 はじめに

本章では，歩行歩容だけでなく，全体重心鉛直加速度の変動が激しい走行歩容も生成できる近似歩容生成手法を提案する．

走行は，様々な状況変化に瞬時に対応できる機敏な運動能力を高める上で，極めて効果的な移動形態である．例えば，走行は，高速な移動であるだけでなく，踏み込みにより足底に大きな摩擦力を発生させて，速度や方向を急峻に変化させることも可能とする．さらに，崩れたバランスを即座に回復させるための手段ともなる．

Raibert ら[5]は，直動アクチュエータを持つロボットにおいて，着地位置を制御する制御則を用いて走行を実現した．Nagasaki ら[23]は，脚長を正弦波状に伸縮させ，Raibert らと同様に，着地位置を制御する手法によって走行パターンを生成した．

2 脚ロボットの目標走行歩容生成法としては，滞空期では，重心が放物運動をおこないつつ重心まわりの角運動量が保存されるように運動を決定し，接地期では，歩行と同様な手法を用いて，目標 ZMP を満足するように運動を決定する手法が，Nagasaka ら[8]，Tajima ら[24]および Kwon ら[25]により提案された．Fujimoto ら[26]も，同様に，滞空期と接地期での運動方程式を別々に立て，エネルギー最小化の観点から運動を生成する手法を提案した．Sugihara ら[27]は，接地期と滞空期の間で，上体姿勢を目標軌道に追従させる制御から全角運動量を保存する制御へと，重みを徐々に変化させて，境界条件を緩和させる手法を提案した．

しかしこれらの手法においては，足底と床の間の摩擦限界が考慮されないので，離床直前や着地直後など，鉛直床反力の小さい時期において，生成される運動パターンが要求する水平床反力が摩擦限界を超え，スリップが発生する恐れがある．スリップは，バランスを崩す大きな原因のひとつであり，避ける必要がある．

本章で提案する手法は，上記課題を解決するために，重心の鉛直運動，上体の水平運動および上体回転運動を，それぞれに対応する動力学モデルで表現し，設定された水平床反力の許容範囲を満足するように，これらの運動を合成することにより走行歩容を生成する．また，生成される歩容の継続性を保証するために，前章で提案した手法（連続で周期的な定常歩容に漸近するように，所定期間分の今回歩容を生成する手法）を走行に拡張する．

以下，5.2 節では，歩容生成システムの概要を説明する．5.3 節では，提案する動力学モデルと，このモデルを用いて水平床反力の許容範囲を満足するように運動の瞬時値を決定する手法を説明する．5.4 節では，定常歩容に漸近するように今回歩容を生成する手法を説明し，5.5 節では，歩容生成例および実際のロボットの走行結果を示す．最後に 5.6 節において，本章をまとめる．

5.2 走行歩容生成システム

本章の歩容生成システムは，前章のシステムと同様，Fig.1.1 に示すように，近似歩容生成部とフルモデル補正部から成り，さらに，近似歩容生成部は，歩容パラメータ決定部，単純モデル歩容生成部および幾何学的写像部とから成るものとする．本章では，単純モデル走行歩容を生成するまでの手法を提案し，幾何学的写像部とフルモデル補正部に関しては，次章

で提案する．

前章で述べた単純モデル歩行歩容は，上体を鉛直（または，所定の姿勢）に維持した歩容であったが，本章の単純モデル歩容では，上体姿勢は，後述する上体回転運動に対応する動力学モデルによって決定されるものとする．

前章と同様，歩容の継続性を保証するために，今回歩容のパラメータ決定において，Fig. 5. 1 のように，今回歩容に続く定常歩容を暫定的に設定することとする．

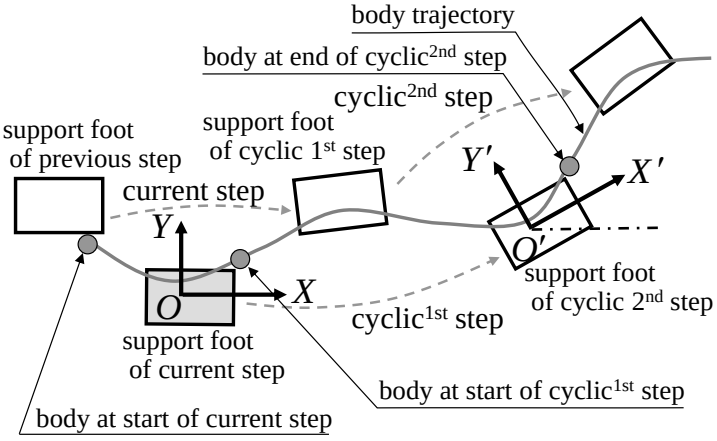


Fig.5.1 Current and cyclic gaits

Fig. 5. 1 の歩容の例では，今回歩容の期間は，Fig. 5. 2 に示すように，今回歩容の遊脚（前回歩容の支持脚）が離床する瞬間から今回歩容の支持脚が離床する瞬間までとする．この例では，今回歩容の終端時刻では，未だ，遊脚は第 1 定常歩容の支持脚接地予定点に移動している途中である．第 1 および第 2 定常歩容に関しても，同様に設定することとする．

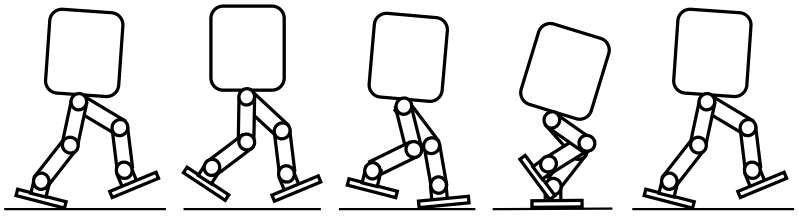


Fig.5.2 Current and cyclic gaits

5.3 動力学モデル

本章では，Fig. 5. 3 に示すように，ロボットの上体の運動を，ロボット全体重心の鉛直運動成分，上体の水平運動成分，および上体の回転運動成分に分離し，それぞれに対応する動力学モデルを用意する．以下では，それぞれの運動成分に関して議論する．

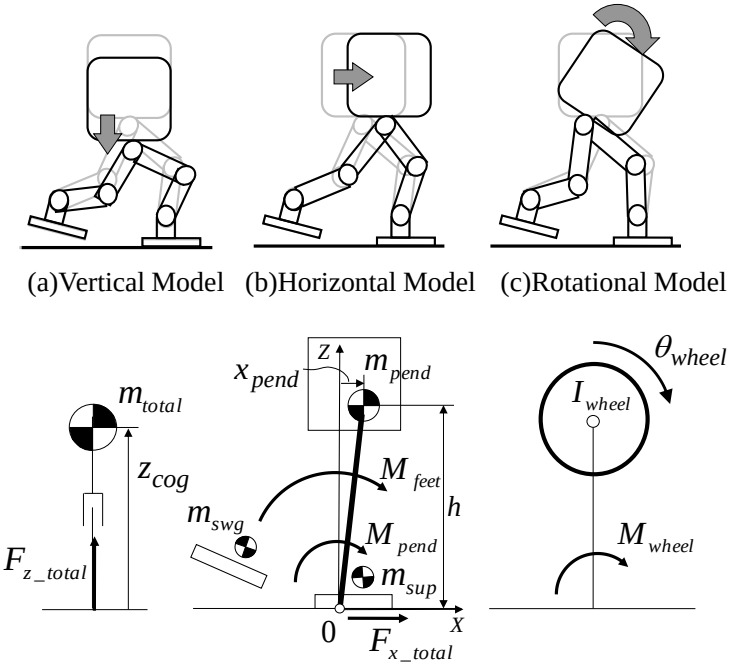


Fig.5.3 Dynamics models

5.3.1 鉛直運動成分

Fig.5.3(a)は，ロボット全体重心の鉛直運動を表すモデルであり，ロボット全質量に相当する質量を持つ質点が，鉛直方向に運動する．以降，全体重心鉛直位置をz_{cog}と表記する．

Fig.5.4 に示すように，一歩の時間は複数の区間に分割され，重心鉛直加速度は，今回歩容と定常歩容において，区間の境界を折れ点とする折れ線状のパターンで表されるものと仮定する．滞空期での重心鉛直加速度は，$-g$（g:重力加速度定数）である．Fig.5.4 の例は，今回歩容において，直立停止状態から重心を一旦下げ，次いで伸び上がることで，定常走行に移行するようすを示している．なお，重心鉛直加速度パターンの設定方法については，詳細を後述する．

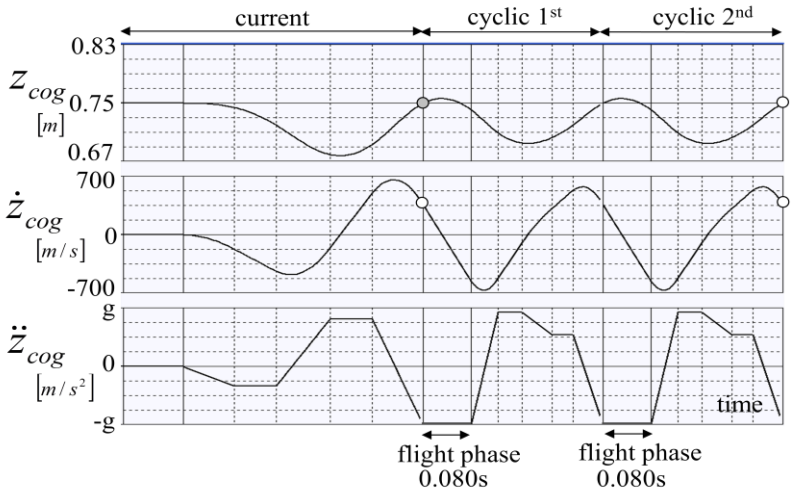


Fig.5.4 Vertical motion of COG

5.3.2 水平運動成分

Fig.5.3(b)は，上体の水平運動に関する動力学モデルである．サジタル面上の運動とラテラル面上の運動は，動力学的に独立しているものとする．以下では，サジタル面上の運動に関して説明する．このモデルは，上体の水平運動に対応する倒立振子と両足部質点から構成される 3 質点モデルである．前章の倒立振子は，鉛直加速度が 0 であったが，本章の倒立振子は，鉛直加速度が変化するものとする．

ここで，水平運動に関する表記を列挙する．

$m_{sup/swg}$: 支持/遊脚足部質点質量
m_{pend}: 倒立振子質点質量
m_{total}: ロボット総質量($= m_{pend} + m_{sup} + m_{swg}$)
$x_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部質点水平位置
$z_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部質点鉛直位置
x_{pend}: 倒立振子水平位置
$\ddot{z}_{pend}$: 倒立振子鉛直加速度
h: 倒立振子の高さ（一定）
$\ddot{z}_{cog}$: ロボット全体重心鉛直加速度
g: 重力加速度定数

以下では，特にことわらない限り，位置，速度，力などは，今回歩容の支持脚座標系（Fig.5.1のXY座標系）で示す．

倒立振子鉛直加速度$\ddot{z}_{pend}$は，前述のように設計された重心鉛直加速度$\ddot{z}_{cog}$と足部質点鉛直加速度$\ddot{z}_{sup}, \ddot{z}_{swg}$を基に，次の関係式より求められる．

$$m_{total}\ddot{z}_{cog} = m_{pend}\ddot{z}_{pend} + m_{sup}\ddot{z}_{sup} + m_{swg}\ddot{z}_{swg} \tag{5.1}$$

倒立振子によって原点まわりに発生する床反力のモーメントを，倒立振子モーメントと呼び，M_{pend}と表記する．すなわち，倒立振子の支点が原点にあり，支点には，M_{pend}のトルクを発生するアクチュエータがあると考える．倒立振子の運動方程式は，次式のようになる．ただし，倒立振子の高さの変動幅は，平均高さに比べて無視できるものとし，倒立振子の高さは一定値hと近似した．

$$\ddot{x}_{pend} = \frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{h} x_{pend} + \frac{1}{h \cdot m_{pend}} M_{pend} \tag{5.2}$$

足部質点によって原点まわりに発生する床反力モーメントを，脚質点モーメントと呼び，m_{feet}と表記する．脚質点モーメントは，次式で求められる．

$$M_{feet} = -m_{sup}x_{sup}(g+\ddot{z}_{sup}) + m_{sup}\ddot{x}_{sup}z_{sup} - m_{swg}x_{swg}(g+\ddot{z}_{swg}) + m_{swg}\ddot{x}_{swg}z_{swg} \quad (5.3)$$

5.3.3 回転運動成分

Fig.5.3(c)は，全体重心位置を変えずに上体を傾ける運動に対応する動力学モデルである．以降，この運動を，単に，回転運動と呼ぶ．

ここで，回転運動に関する表記を列挙する．

θ_{wheel}: フライホイール角
M_{wheel}: フライホイールよって発生する床反力モーメント
I_{wheel}: フライホイール慣性モーメント

フライホイール角θ_{wheel}は，上体傾き角に相当する．フライホイールよって発生する床反力モーメントM_{wheel}は，上記回転運動によってロボット全体が発生する床反力モーメントに相当する．回転運動を行った時にロボット全体が発生する床反力モーメントと上体傾き角加速度とは，比例するものとし，次式の関係が成立するものとする．

$$M_{wheel} = I_{wheel}\ddot{\theta}_{wheel} \quad (5.4)$$

5.3.4 運動の合成

前述の 3 つの運動成分を合成した運動によって発生する床反力を，総合床反力と呼ぶ．

総合床反力が原点まわりに作用するモーメントを，総合床反力モーメントあるいは単に床反力モーメントと呼び，M_{total}と表記する．M_{total}は，次式で求められる．

$$M_{total} = M_{feet} + M_{pend} + M_{wheel} \quad (5.5)$$

総合床反力の水平成分を，総合水平床反力あるいは単に水平床反力と呼び，F_{x_total}と表記する．F_{x_total}は，次式で求められる．

$$F_{x_total} = m_{pend}\ddot{x}_{pend} + m_{sup}\ddot{x}_{sup} + m_{swg}\ddot{x}_{swg} \quad (5.6)$$

総合床反力の鉛直成分を，総合鉛直床反力あるいは単に鉛直床反力と呼び，F_{z_total}と表記する．F_{z_total}は，次式で求められる．

$$F_{z_total} = m_{total}(\ddot{z}_{cog} + g) \quad (5.7)$$

水平運動成分は，床反力モーメントを発生させる場合に，水平床反力（摩擦力）を発生するが，回転運動成分は，床反力モーメントを発生させる場合に，水平床反力を発生しない．次節では，この性質を利用して，水平運動成分と回転運動成分の合成の割り合いを調整することによって，総合水平床反力が許容範囲に制限され，総合床反力モーメントが目標値に一致するように，歩容の瞬時値を生成する手法を述べる．

5.3.5 水平床反力の制限を考慮した運動合成

歩容の足部軌道と目標 ZMP 軌道は与えられているものとする．以降，目標 ZMP をx_{total}^{ZMP}と表記する．Fig.5.5 上段の点線は，つま先で蹴って滞空期に移行し，べた足で着地する場合の目標 ZMP 軌道の例である．この例では，目標 ZMP は，滞空期に，後ろ側の脚のつま先から前側の脚の足首直下に移動し，接地期に，支持脚のつま先に徐々に移動している．なお，滞空期における目標 ZMP 軌道は，任意に設定しても運動に影響がないので，便宜上，適当な連続軌道に設定されることとする．

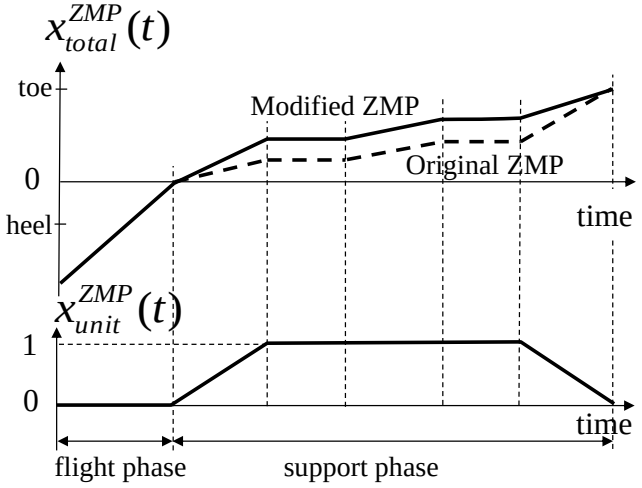


Fig.5.5 Original and modified ZMP trajectories

重心鉛直加速度$\ddot{z}_{cog}$パターンも，前述のように折れ線で設定されているものとする．

歩容生成では，基本的には，動力学モデル全体の運動が目標 ZMP を満足するように，（すなわち，動力学モデル全体が目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメントの水平成分が，0 となるように）倒立振子の水平加速度を決定するが，総合水平床反力が許容範囲から逸脱する場合には，倒立振子の水平加速度が制限される．この制限によって削減された床反力モーメントを補うために，フライホイールが加速される．このままでは，フライホイールが発散する恐れがあるので，鉛直床反力が十分に大きく，総合水平床反力が許容範囲から逸脱する可能性がない時期に，フライホイールに復元モーメント（M_{wheel_rec}と表記する）を加える．このモーメントを生成するために，Fig.5.6 に示すように，フライホイール復元用 ZMP（$x_{wheel_rec}^{ZMP}$と表記する）のパターンを，歩容パラメータの中に用意しておく．

以下に，単純モデル歩容の瞬時値の生成手順を示す．

STEPa1）歩容パラメータを基に，足部質点運動瞬時値，目標 ZMP x_{total}^{ZMP}，重心鉛直加速度，および鉛直床反力を算出する．

STEPa2）動力学モデル全体が目標 ZMP まわりに発生すべき床反力モーメントの水平成分が，0 であることから，次式により，原点まわりの目標の総合床反力モーメントM_{total}を

求める.

$$M_{total} = -F_{z_total} x_{total}^{ZMP} \tag{5.8}$$

STEPa3) 水平床反力許容範囲$[-F_{lim}, F_{lim}]$を，次式によって決定する．ただし，μは，足底と床の間の摩擦係数以下に設定する．Fig.5.7 は，許容範囲を模式的に図示したものである.

$$F_{lim} = \mu\, m_{total}(\ddot{z}_{cog} + g) \tag{5.9}$$

STEPa4) 歩容パラメータを基に，フライホイール復元用 ZMP $x_{wheel_rec}^{ZMP}$を求め，次式により，フライホイール復元モーメントM_{wheel_rec}を算出し，この値をM_{wheel}に代入する.

$$M_{wheel_rec} = -F_{z_total} x_{wheel_rec}^{ZMP} \tag{5.10}$$

STEPa5) 式(5.3)により，M_{feet}を求める.

STEPa6) 式(5.5)により，M_{pend}を求める.

STEPa7) 式(5.2)により，$\ddot{x}_{pend}$を求める.

STEPa8) 式(5.6)により，F_{x_total}を求める.

STEPa9) F_{x_total}が許容範囲$[-F_{lim}, F_{lim}]$を超えないように，倒立振子の加速度を制限する．具体的には，次式によって求められるM_{pend}^{mdfd}を式(5.2)のM_{pend}に代入することで，改めて$\ddot{x}_{pend}$を求める.

$$M_{pend}^{mdfd} = \begin{cases} M_{pend} - h\left(F_{x_total} - F_{lim}\right) & (F_{x_total} > F_{lim}) \\ M_{pend} - h\left(F_{x_total} + F_{lim}\right) & (F_{x_total} < -F_{lim}) \\ M_{pend} & (else) \end{cases} \tag{5.11}$$

STEPa10) 上記制限によって削減された総合床反力モーメントを補うために，次式によりM_{wheel}を再決定し，式(5.4)により$\ddot{\theta}_{wheel}$を求める.

$$M_{wheel} = M_{total} - M_{pend}^{mdfd} - M_{feet} \tag{5.12}$$

STEPa11) $\ddot{x}_{pend}$と$\ddot{\theta}_{wheel}$をそれぞれ積分して，倒立振子の水平位置と速度，フライホイールの角度と角速度を得る.

STEPa12) 重心鉛直位置，倒立振子の位置およびフライホイール角を基に，対応する上体位置・姿勢角を算出する．(次章の幾何学的写像部)

以上の手順によって生成される運動は，目標 ZMP を満足しつつ，水平床反力が許容範囲内

に収められる(Fig.5.7 太線)．また，鉛直床反力を 0，水平床反力の許容範囲を[0,0]に設定するだけで，自動的に重心は放物運動となり，角運動量変化率は 0 となる．すなわち，本手法によって，滞空期と接地期の運動生成が統一的に表される．

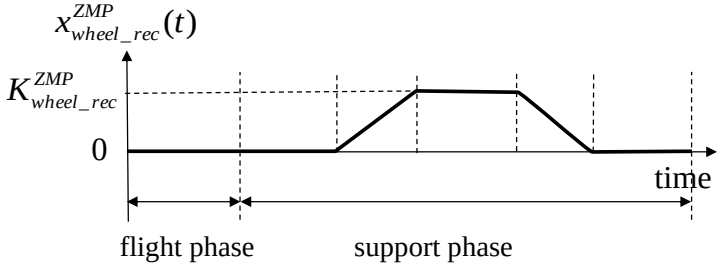


Fig.5.6 Wheel moment for recovering

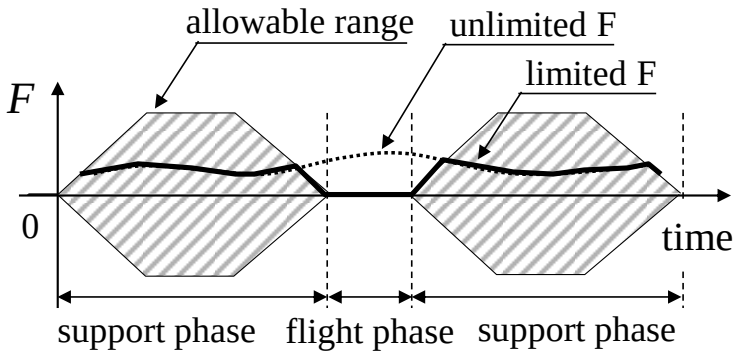


Fig.5.7 Allowable range of horizontal reaction force

5.4 定常歩容に漸近する歩容の生成

歩容パラメータの設定が不適切である場合に，歩容の瞬時値の算出手順（STEPa1～12）に従って歩容を生成し続けると，実現不可能な全体姿勢になるおそれがある．これを防ぎ，歩容生成の継続性を保証するために，以下では，前章で述べた手法（今回歩容の上体軌道が定常歩容の上体軌道に漸近するように，今回歩容パラメータを決定する手法）を走行に拡張する．

5.4.1 継続性を保証する歩容パラメータの決定法

歩容パラメータの決定手法について,まず,その概要を以下に示す.なお,STEPb1 から STEPb5 までは，今回歩容とそれに続く定常歩容のパラメータが設計される．

STEPb1）移動指示（移動速度ベクトルや旋回角速度など）に応じて，目標着地位置と歩行周期を決定する(Fig.5.1)．

STEPb2) 足部軌道を決定する.

STEPb3) 鉛直重心運動パターンを決定する(Fig.5.4). 具体的には, 各区間の境界時刻を適当に定めておいてから,以下のように折れ線状のパターンを設計する.なお,Fig.5.4の例では, 鉛直加速度が急激に変化しないように, 鉛直加速度が変化する区間を, 鉛直加速度が一定の区間よりも長めに設定している. 定常歩容の連続性の条件から, 定常歩容の重心鉛直加速度パターンは, 平均加速度が 0 となるように設計される. 定常歩容の初期重心鉛直速度は,定常歩容の平均速度が0となるように決定される. また, 定常歩容の初期重心鉛直位置は, 膝関節角度が適切な値となるように決定される. 今回歩容の重心鉛直加速度パターンは, 今回歩容終端での鉛直重心位置・速度が, 定常歩容始端での位置・速度に一致するように設計される. 例えばFig.5.4においては,今回歩容での2箇所の一定加速度期間における加速度値が調整される.

STEPb4) 目標 ZMP 軌道を, 前述のように設定する.

STEPb5) 水平床反力の許容範囲を, 前述のように設定する(Fig.5.7).

STEPb6) 定常歩容が連続性の条件を満足するように, 定常歩容パラメータを探索する.

STEPb7) 今回歩容の倒立振子が定常歩容に漸近し, かつ, 今回歩容のフライホイール軌道が定常歩容のフライホイール軌道に接続するように, 今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータとフライホイール復元用 ZMP 軌道パラメータを修正する.

以下では, STEPb6 と STEPb7 について説明する.

5.4.2 定常歩容の初期状態の探索

本節では, 連続性の条件を満足するように定常歩容の初期状態を探索するアルゴリズムについて説明する.

STEPc1) フライホイール復元用 ZMP パターンの台形高さ$K_{wheel_rec}^{ZMP}$を 0, フライホイールの初期角速度を 0 に仮設定する. なお, フライホイールの初期角度は適当に決定する.

STEPc2) 倒立振子の初期状態として, ある候補を選ぶ.

STEPc3) 定常歩容パラメータを基に, 5.3.5 節に示した運動生成法に従って歩容を生成し, 倒立振子の終端状態を得る.

STEPc4) 倒立振子の終端状態と初期状態との差を求める. ただし, この時, 倒立振子の終端状態は, 定常歩容 2 歩目の支持脚座標系 (Fig.5.1 の$X'Y'$座標系) 上の値に, 倒立振子の初期状態は, 今回歩容の支持脚座標系 (Fig.5.1 のXY座標系) 上の値に, それぞれ変換しておく.

STEPc5) 上記の差が十分に小さくなるまで, 最急降下法などの数値最適化手法を用いて倒立振子初期状態の新たな候補を決定しながら STEPc3 と STEPc4 を繰り返すことにより, 定常歩容の連続性の条件を満足する倒立振子初期状態を得る.

STEPc6) フライホイールの終端状態と初期状態の間の角度差と角速度差を求める.

STEPc7) 上記の差が 0 となるように, $K_{wheel_rec}^{ZMP}$と初期角速度を修正する. ただし, 第 1 定常

歩容の$K_{wheel_rec}^{ZMP}$と第２定常歩容の$K_{wheel_rec}^{ZMP}$は，同じ値に設定することとする．なお，フライホイールは線形であるので，$K_{wheel_rec}^{ZMP}$と初期角速度の修正量は，解析的に算出できる．

STEPc8）$K_{wheel_rec}^{ZMP}$を修正すると倒立振子の挙動が変化するので，$K_{wheel_rec}^{ZMP}$の修正量が十分に小さくなるまで，STEPc2 から STEPc7 を繰り返す．

以上のアルゴリズムにより，今回歩容の支持脚座標系から見た定常歩容の倒立振子初期状態（位置：$x_{pend}^{cyc_init}$，速度：$\dot{x}_{pend}^{cyc_init}$）とフライホイールの初期状態（位置：$\theta_{wheel}^{cyc_init}$，速度：$\dot{\theta}_{wheel}^{cyc_init}$）を得る．

5.4.3 鉛直加速度変化を考慮した発散成分の提案

前章において，今回歩行歩容を定常歩行歩容に漸近させるために，両足部質点と鉛直方向加速度が 0 の線形倒立振子とから成るモデルの運動に対し，収束成分，発散成分，という概念を提案した．以下では，鉛直方向の加速度変化を伴う倒立振子の運動に対応できるように，この概念を拡張する．なお，以下の議論では，水平床反力の制限は行われないものとする．

まず，式(5.2)を，次式のように状態方程式で表現する．ただし，“T”は転置を表す．

$$\dot{\mathbf{x}} = A_c(t)\mathbf{x} + B_c(t)\mathbf{u} \qquad \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_{pend} & \dot{x}_{pend} \end{pmatrix}^T \qquad \mathbf{u} = M_{pend}$$

$$A_c(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \dfrac{(g+\ddot{z}_{pend})}{h} & 0 \end{pmatrix}, B_c(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ \dfrac{1}{h \cdot m_{pend}} \end{pmatrix} \tag{5.13}$$

サンプリング時間をΔTとし，入力を 0 次ホールドとすることで，この系を次式のように離散化する．

$$\mathbf{x}(k+1) = A(k)\mathbf{x}(k) + B(k)\mathbf{u}(k) \tag{5.14}$$

ここで，

$$\omega_0 = \sqrt{\left|\frac{g+\ddot{z}_{pend}}{h}\right|} \tag{5.15}$$

と置くと，$A(k), B(k)$は，次式のようになる．

$\ddot{z}_{pend} > -g$ならば，

$$A(k) = \begin{pmatrix} \cosh(\omega_0 \Delta T) & \dfrac{\sinh(\omega_0 \Delta T)}{\omega_0} \\ \omega_0 \sinh(\omega_0 \Delta T) & \cosh(\omega_0 \Delta T) \end{pmatrix}, B(k) = \begin{pmatrix} \dfrac{\cosh(\omega_0 \Delta T) - 1}{{\omega_0}^2 \cdot h \cdot m_{pend}} \\ \dfrac{\sinh(\omega_0 \Delta T)}{\omega_0 \cdot h \cdot m_{pend}} \end{pmatrix}$$

$\ddot{z}_{pend} = -g$ならば，

$$A(k)=\begin{pmatrix}1 & \Delta T\\ 0 & 1\end{pmatrix}, B(k)=\begin{pmatrix}\frac{(\Delta T)^2}{2}\frac{1}{h\cdot m_{pend}}\\ \Delta T\frac{1}{h\cdot m_{pend}}\end{pmatrix}$$

$\ddot{z}_{pend} < -g$ならば，

$$A(k)=\begin{pmatrix}\cos(\omega_0\Delta T) & \frac{\sin(\omega_0\Delta T)}{\omega_0}\\ -\omega_0\sin(\omega_0\Delta T) & \cos(\omega_0\Delta T)\end{pmatrix}, B(k)=\begin{pmatrix}-\frac{\cos(\omega_0\Delta T)-1}{\omega_0{}^2\cdot h\cdot m_{pend}}\cdot\\ \frac{\sin(\omega_0\Delta T)}{\omega_0\cdot h\cdot m_{pend}}\cdot\end{pmatrix} \quad (5.16)$$

初期状態$\boldsymbol{x}(0)$と入力時系列$\boldsymbol{u}(k)$が与えられた時，$\boldsymbol{x}(k)$は，次式のようになる．

$$\mathbf{x}(k)=\phi(k,0)\mathbf{x}(0)+\sum_{i=0}^{k-1}\phi(k,i+1)B(i)\mathbf{u}(i) \quad (5.17)$$

ただし，

$$\phi(k,j)=\begin{cases}A(k-1)A(k-2)\cdots A(j) & (k>j)\\ I & (else)\end{cases} \quad (5.18)$$

ここで，改めて，定常歩容の初期時刻を時刻 0，定常歩容の終端時刻をk^E_{cyc}，時刻kでの状態遷移行列を$A_{cyc}(k)$，入力行列を$B_{cyc}(k)$，入力を$\boldsymbol{u}_{cyc}(k)$とする．また，連続性の条件を満足した定常歩容の倒立振子状態量を$\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$と置き，初期状態が$\boldsymbol{x}_{cyc}(0)+\Delta\boldsymbol{x}_{cyc}(0)$（ただし，$\Delta x_{cyc}(k)$は，定常状態からの摂動量）である場合での時刻$k$の状態量を，$\boldsymbol{x}_{cyc}(k)+\Delta\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$と表す．

式(5.18)までと同様の議論により，以下の式を得る．

$$\mathbf{x}_{cyc}(k)=\phi_{cyc}(k,0)\mathbf{x}_{cyc}(0)+\sum_{i=0}^{k-1}\phi_{cyc}(k,i+1)B_{cyc}(i)\mathbf{u}_{cyc}(i) \quad (5.19)$$

$$\mathbf{x}_{cyc}(k)+\Delta\mathbf{x}_{cyc}(k)=\phi_{cyc}(k,0)\left(\mathbf{x}_{cyc}(0)+\Delta\mathbf{x}_{cyc}(0)\right)+\sum_{i=0}^{k-1}\phi_{cyc}(k,i+1)B_{cyc}(i)\mathbf{u}_{cyc}(i) \quad (5.20)$$

ただし，

$$\phi_{cyc}(k,j)=\begin{cases}A_{cyc}(k-1)\cdots A_{cyc}(j) & (k>j)\\ I & (else)\end{cases} \quad (5.21)$$

式(5.19)(5.20)より，次式を得る．

$$\Delta\mathbf{x}_{cyc}(k)=\phi_{cyc}(k,0)\Delta\mathbf{x}_{cyc}(0) \quad (5.22)$$

さらに，式(5.22)のkにk^E_{cyc}を代入して，次式を得る．

$$\Delta\mathbf{x}_{cyc}(k^E_{cyc})=\phi_{cyc}(k^E_{cyc},0)\Delta\mathbf{x}_{cyc}(0) \quad (5.23)$$

$\phi_{cyc}(k_{cyc}^{E},0)$の固有値を$\lambda_p,\lambda_q$とすると，$\ddot{z}_{pend}$の値にかかわらず$A_{cyc}(k)$の行列式の値は 1 であることから，次式の関係を得る．

$$\lambda_p\lambda_q = \det\phi_{cyc}(k_{cyc}^{E},0) = \prod_{k=0}^{k_{cyc}^{E}-1}\det A(k) = 1 \tag{5.24}$$

ところで，$A_{cyc}(k)$の 2 つの固有値の積は 1 である．また，$\ddot{z}_{pend}$が，$-g$より正側に大きい場合には，$A_{cyc}(k)$の固有値は，互いに異なる実数の組になり，そうでない場合には，$A_{cyc}(k)$の固有値は，共役複素数の組になる．厳密な議論はできないが，$\phi_{cyc}(k_{cyc}^{E},0)$の固有値に関しても同様な傾向があると考えられる．定常歩容の$\ddot{z}_{pend}$の平均値は 0 であり，$-g$よりも正側に十分に大きいので，以下では，λ_qは 1 より大きい実数，λ_pは 1 より小さい実数であるとする．この点については，5.5 節で改めて議論する．

固有値λ_p,λ_qそれぞれに対応して，ある固有ベクトルを選び，列ベクトルとして並べると，次の形式を持った変換行列Γ_{cyc}が得られる．

$$\Gamma_{cyc}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & -\gamma_p \\ 1 & \gamma_q \end{pmatrix} \tag{5.25}$$

ただし，γ_p,γ_qは正の実数である．Γ_{cyc}を用いて，次式のように，$\Delta\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$を$(\Delta p(k) \quad \Delta q(k))^T$に変換する．

$$(\Delta p(k) \quad \Delta q(k))^T = \Gamma_{cyc}^{-1}\Delta\mathbf{x}_{cyc}(k) \tag{5.26}$$

これを式(5.23)(5.26)より，次式を得る．

$$\left(\Delta p(k_{cyc}^{E}) \quad \Delta q(k_{cyc}^{E})\right)^T = \Lambda\left(\Delta p(0) \quad \Delta q(0)\right)^T \tag{5.27}$$

ただし，

$$\Lambda = \Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{cyc}(k_{cyc}^{E},0)\Gamma_{cyc} \tag{5.28}$$

である．Λは次式のような対角行列になる．

$$\Lambda = diag\left(\lambda_p,\lambda_q\right) \tag{5.29}$$

以上の関係から，定常歩容をn回繰り返すと，$\Delta p(0)$は，λ_pのn乗倍になり，$\Delta q(0)$は，λ_qのn乗倍になる．すなわち，$\Delta p(0)$は 0 に収束し，$\Delta q(0)$は発散する傾向を持つ．

ここで，次式により，定常歩容の初期収束成分$p_{cyc}(0)$と初期発散成分$q_{cyc}(0)$を定義する．

$$\left(p_{cyc}(0) \quad q_{cyc}(0)\right)^T = \Gamma_{cyc}^{-1}\mathbf{x}_{cyc}(0) \tag{5.30}$$

今回歩容の終端状態を基に変換行列Γ_{cyc}を用いることによって求められる今回歩容の終端発散成分が，定常歩容の初期発散成分に一致していれば，今回歩容の終端状態を初期状態として，定常歩容パラメータを用いて運動を生成し続けると，$\Delta q(0)$が 0 であるので，倒立振子は，$\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$に漸近する．次節では，この性質を用いて，定常歩容に漸近するように今回歩容を修正する手法を述べる．

なお，水平床反力の制限機能がある場合でも，$\Delta q(k)(k = 0,1,2,\dots)$の挙動は，制限機能の影響を受けにくい．この理由を説明するために，改めて$\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$を，制限機能がある場合の定常歩容の倒立振子軌道であるとすると，$\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$が制限に掛っている時には，$\Delta q(k)$によって発生する水平床反力は，制限を受けて 0 に近づくか，制限を受けないかのいずれかである．

ところが，$\boldsymbol{x}_{cyc}(k)$が制限に掛かる時期では，鉛直床反力もほぼ 0 であるので，制限動作がなかったとしても，$\Delta q(k)$によって発生する水平床反力は，元々0 に近い．すなわち，$\Delta q(k)$の挙動は，制限機能が有る場合でも，無い場合と大きくは違わない．

5.4.4 今回歩容倒立振子の定常歩容初期発散成分への接続

本節では，今回歩容の倒立振子が定常歩容に漸近するように，今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する手法を説明する．

STEPd1）まず，前述のように求めた定常歩容の初期状態から，定常歩容の初期発散成分$q_{cyc}(0)$を求める．

STEPd2）Fig.5.5 下段に示す単位高さの台形状の修正用 ZMP 軌道$x_{unit}^{ZMP}(t)$を準備する．

STEPd3）台形状の修正用 ZMP 軌道の大きさを決定するための定数候補k_{add}^{ZMP}に 0 を代入する．

STEPd4）修正された軌道が今回歩容の目標 ZMP 軌道に$k_{add}^{ZMP}x_{unit}^{ZMP}(t)$を加えた軌道となるように，今回歩容の目標 ZMP 軌道パラメータを修正する(Fig.5.5 上段)．

STEPd5）今回歩容パラメータを基に，始端から終端まで歩容を生成し(5.3.5 節)，得られた終端状態から今回歩容終端発散成分$q_{curr}(k_{curr}^{E})$を求める．

STEPd6）$q_{curr}(k_{curr}^{E})$と$q_{cyc}(0)$の差q_{diff}を求める．

STEPd7）上記の差が十分に小さくなるまで,最急降下法などの数値最適化手法を用いてk_{add}^{ZMP}の新たな候補を決定しながら STEPd4 から STEPd6 までを繰り返す．(補足すると，水平床反力の制限により，目標 ZMP と倒立振子の運動との関係は非線形になるため，k_{add}^{ZMP}は解析的には求まらない.)

以上のように，境界条件として，位置と速度の両方を用いる代わりに発散成分を用いることによって，境界条件が緩和される．この結果，ZMP 軌道の修正量が比較的小さくなることが期待される（4.4.3 節と 4.5.2 節参照)．

5.4.5 今回歩容フライホイールの定常歩容への接続

本節では，今回歩容のフライホイール軌道が定常歩容のフライホイール軌道に接続するよ

うに，今回歩容のフライホイール復元用 ZMP 軌道を修正する手法を説明する．

STEPe1）まず，前節のように目標 ZMP 軌道が修正された今回歩容の終端フライホイール角・角速度と，5.4.2 節で求められた定常歩容の初期フライホイール角・角速度との差を求める．

STEPe2）今回歩容と第 1 定常歩容に，それぞれ Fig.5.6 と同様の 1 自由度の台形状のフライホイール復元用 ZMP 軌道を準備する．

STEPe3）今回歩容と第 1 定常歩容を続けて生成した時に，その終端状態が第 2 定常歩容の初期状態と一致するように，それぞれの台形高さを解析的に決定する．

STEPe4）フライホイールの挙動だけを修正すると，動力学モデルの運動による慣性力と床反力とのつり合いが崩れてしまう．そこで，STEPd4 で修正された目標 ZMP 軌道とフライホイール復元用 ZMP 軌道を合成した軌道になるように，目標 ZMP 軌道パラメータを修正する．

なお，フライホイールの接続のために，今回歩容と第 1 定常歩容の両方の期間を使って軌道を修正するので，このための目標 ZMP の修正量は比較的小さい．したがって，ZMP 軌道が，修正によって支持多角形から逸脱するおそれは少ない．

5.5 走行歩容の生成例

ASIMO Ver.2(Fig.5.10)(Fig.5.11)の実験機に対して,5.0[km/h]の定常走行から 6.0[km/h]の定常走行まで加速する単純モデル走行歩容を生成した例を Fig.5.8 に示す．左から順に，前回歩容，今回歩容，第 1 定常歩容，第 2 定常歩容を表す．前回歩容の歩幅は 0.440[m]，今回歩容と定常歩容の歩幅は 0.525[m]とした．また，すべての歩容に関して，接地期間は 0.235[s]，滞空期間は 0.080[s]とした．本ロボットに対応する 3 質点モデルの上体質量比率$\left(m_{pend}/m_{total}\right)$は 0.82，倒立振子の高さ$h$は 0.803[m]とし，制御周期は 5[ms]とした．

倒立振子鉛直加速度（最上段の図の点線）には，滞空期において，自由落下を超えた下向きの加速度が現れている．これは，滞空期において，脚質点の下向きの加速度が小さいためである．この定常歩容の倒立振子鉛直加速度パターンを基に，式(5.15)(5.16)(5.21)を用いて，$\boldsymbol{\phi}_{cyc}\left(k_{cyc}^{E},0\right)$のふたつの固有値を求めると，共に実数となり，$\lambda_q$は 8.82，$\lambda_p$は 0.113 になった.仮に,定常歩容の倒立振子鉛直加速度が常に 0 であったとすると,λ_qは 9.04,λ_pは 0.111 となるので，倒立振子鉛直加速度のパターンが$\boldsymbol{\phi}_{cyc}\left(k_{cyc}^{E},0\right)$の固有値に及ぼす影響は，数パーセント以下であると言える．

滞空期およびその近傍においては，フライホイールを加速させることによって，水平床反力が許容範囲（最下段の図の点線）内に制限されている様子が見られる．一方，鉛直床反力が大きい時期には，フライホイール復元用 ZMP によって，フライホイールを目標角度（本例では 0 度）に戻すための角加速度が発生している．原点まわりの目標総合床反力モーメントM_{total}は，今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させるための目標 ZMP 修正量$k_{add}^{ZMP}x_{unit}^{ZMP}(t)$とフライホイール復元用 ZMP $x_{wheel_rec}^{ZMP}$とによって修正されているが，M_{total}

の修正量のほとんどが$k_{add}^{ZMP}x_{unit}^{ZMP}(t)$によるものである．$k_{add}^{ZMP}x_{unit}^{ZMP}(t)$は，Fig.5.5 のような台形状であり，台形高さk_{add}^{ZMP}は，-0.050[m]である．したがって，修正された目標 ZMP 軌道は，支持多角形内に収まっている．

提案する手法によって生成された単純モデル歩容を用いて実験用ロボットを実際に走行させた時の鉛直床反力と水平床反力を Fig.5.9 に示す．ただし，歩容の動力学的精度を高めるために，次章で提案する幾何学的写像とフルモデル補正によって，単純モデル歩容（倒立振子軌道，フライホイール軌道，足部位置・姿勢角軌道および床反力軌道の組）から最終的な目標歩容（上体位置・姿勢角軌道，足部位置・姿勢角軌道および床反力軌道の組）が決定されている．

床と足底の間の摩擦係数は 0.4 である．床反力の実際値は，両足首下に備えられた 6 軸力センサ検出値から求めている．滞空期にも，水平床反力が発生しているように見えるが，脚先端部の慣性力の影響による測定誤差である．鉛直床反力に関しては，実際値と目標値の差が減少するように，足部の位置を修正するフィードバック制御（8.11 節の並進コンプライアンス制御）が行われているため，この差は，目標鉛直床反力ピーク値の 20 パーセント以下に収まっている．

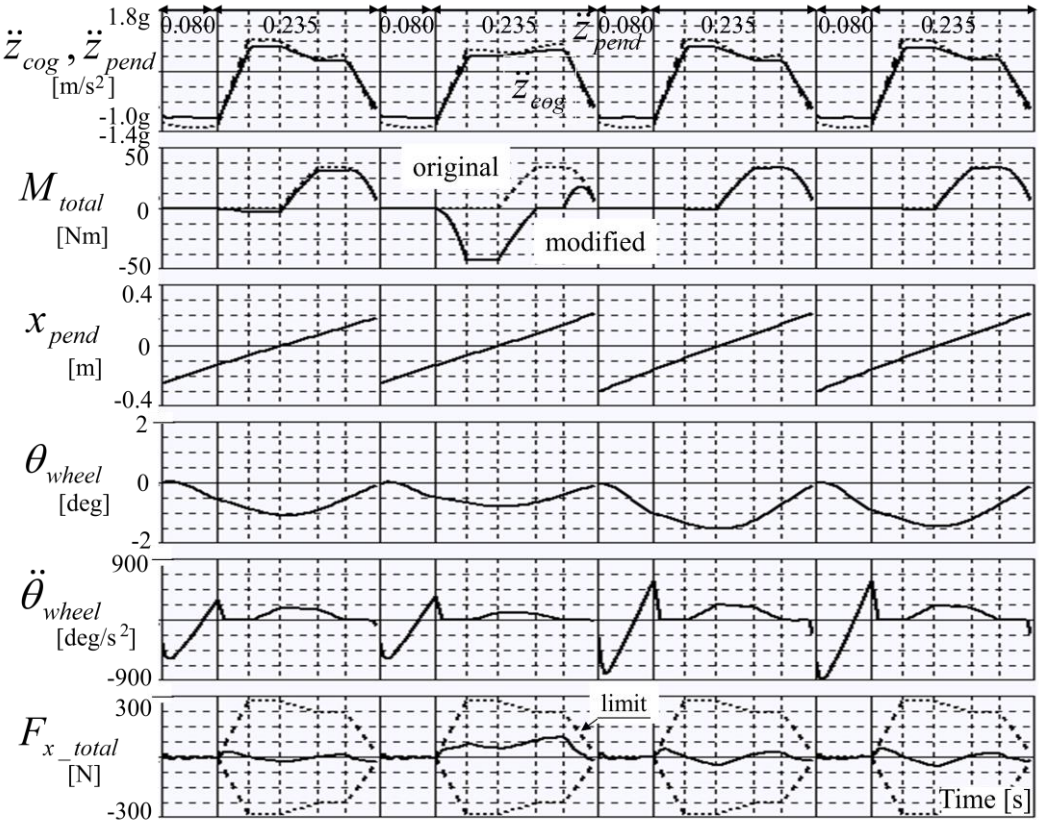


Fig.5.8 Trajectories of inverted pendulum and flywheel model during running from 5[km/h] to 6[km/h]

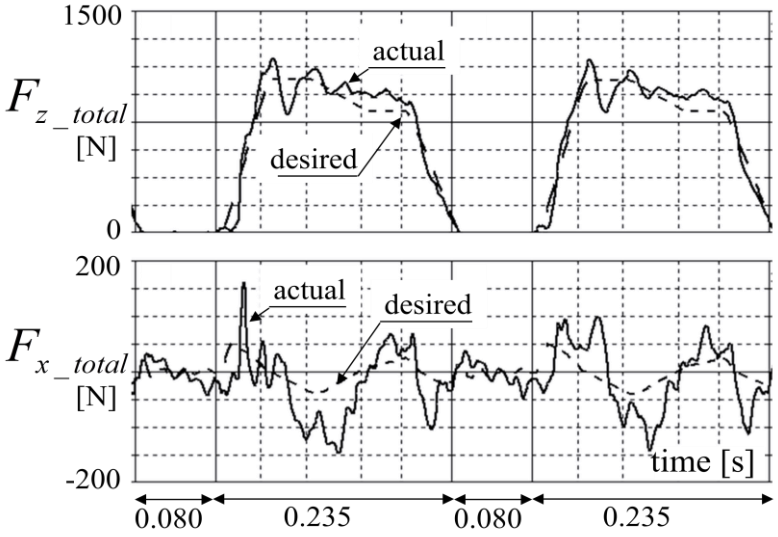


Fig.5.9 Ground reaction forces during running at 6[km/h]

これに対し，水平床反力に関しては，コンプライアンス制御を行っていないため，実際値の変動は比較的大きい．しかし，摩擦円錐内に床反力が収まっており，スリップは生じていない．

5.6 まとめ

本章では，鉛直床反力に応じて水平床反力の許容範囲を設定し，この範囲を超えないように，上体水平運動に対応する倒立振子と，上体回転運動に対応するフライホイールの運動を決定することにより，スリップし難い走行歩容を生成する手法を提案した．また，鉛直方向の加速度変化を伴う倒立振子の運動に対する発散成分，という概念を提案し，今回歩容終端発散成分と，暫定的に設定された定常歩容の初期発散成分とが一致するように，今回歩容を修正する手法を提案した．この手法により，今回歩容の目標 ZMP の修正量は比較的小さくなり，今回歩容は定常歩容に漸近する．すなわち，ZMP 軌道が支持多角形から逸脱することを抑制しつつ，継続性を保証した歩容が生成できるようになった．本章の手法では，滞空期は，鉛直床反力を 0，水平床反力許容範囲を[0,0]とすることで表現され，滞空期と接地期が統一的に扱われる．また，歩行と走行との中間的な運動や低い摩擦係数の床での歩行にも対応できる．最後に，これらの手法の有効性を，シミュレーションおよび実機走行実験により示した．

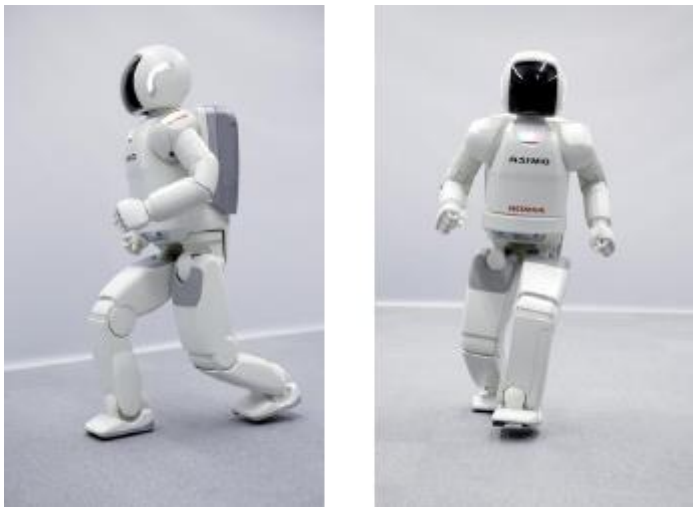


Fig.5.10 Running biped robot (ASIMO Ver.2)

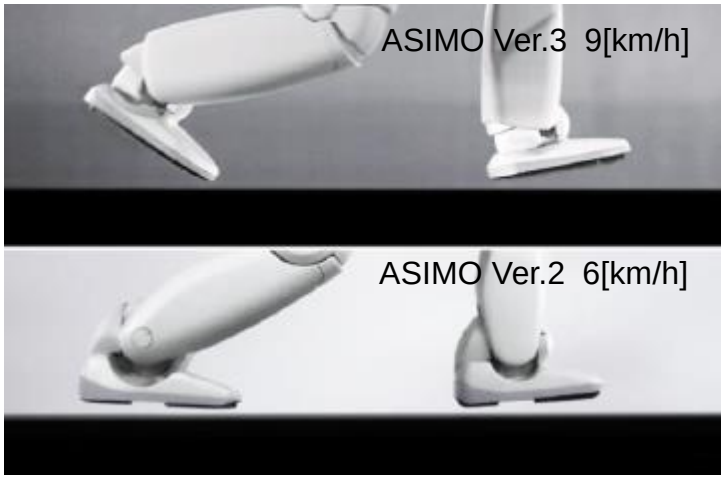


Fig.5.11 Running biped robot during flight phase

第６章．フルモデル補正

第６章. フルモデル補正

6.1 はじめに

本章では，単純モデル歩容から，動力学的精度を高めた最終的な目標歩容を得るための歩容補正手法（幾何学的写像とフルモデル補正）を提案する．

緒論で述べたように，これまでも歩容補正手法がいくつか提案されている．これらをより具体的に説明すると，長阪[14]は，近似歩容をフルモデルに入力して ZMP 誤差を求め，これを打ち消すように上体の水平位置を補正する「動力学フィルタ」を提案している．Yamane と Nakamura[15]は，多リンクのロボットと環境との間の接触，摩擦，衝突などを考慮した動力学シミュレータを用いて，関節角と上体の位置・姿勢角の近似歩容からの補正量の重み付き二乗和が最小となるように歩容を補正する「Dynamics Filter」を提案している．また，梶田ら[16]の「分解角運動量制御」においても，倒立振子モデルを用いて生成した歩行歩容の重心軌道を基に目標運動量を設定し，フルモデルの運動量をこれに追従させることによって，歩容補正が実現されている．しかし，これらの手法は，走行歩容（鉛直床反力が 0 または微小となる期間を有する歩容）には対応できない．

Tajima ら[24]は，鉛直加速度が変化する 1 質点と ZMP の関係を基に，重心位置，足部位置・姿勢，角運動量から成る目標運動を解析的に生成し，分解角運動量制御を用いて，身長 1.3[m]のロボットで歩行と走行を両立させた．しかし，上体の姿勢変化に密接な関係を持つ角運動量目標値を，ヒューリスティックに，重心横速度に比例するように決定しているので，急旋回，スラローム，斜め移動などの複雑な歩容に対しては，希望に沿った歩容が生成される保証がない．また両者は，床の摩擦限界を考慮していないので，走行時の離床直前や着地直後のように鉛直床反力が微小となる期間において，スリップする恐れがある．

本章では，水平床反力と目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分（以降，本章では，床反力モーメントの水平成分を，単に床反力モーメントと略す）の許容範囲を設定し，この範囲を越えないように，鉛直床反力の変化を考慮した補正用の摂動動力学モデルを用いて，近似歩容の上体位置と姿勢角を補正する手法を提案する．本手法により，歩行歩容のみならず走行歩容に対しても統一的に，その運動から算出される ZMP が支持多角形から逸脱せず，かつ，スリップしにくくなるように補正することが可能となる．

以下，6.2 節では，歩容生成システムの概要を説明する．6.3 節では，動力学を用いずに動力学誤差を低減する手法である幾何学的写像を提案する．6.4 節では，提案するフルモデル補正の概要を述べ，6.5 節では，フルモデル補正用の摂動動力学モデルについて説明し，6.6 節では，このモデルを用いた補正手法を提案する．6.7 節では，本手法を走行歩容に適用した場合のシミュレーションと実機走行の結果を示し，最後に 6.8 節において，本章をまとめる．

6.2 歩容生成システム

Fig.1.1 に示したように，歩容生成システムは，近似歩容生成部とフルモデル補正部から成り，さらに，近似歩容生成部は，歩容パラメータ決定部，単純モデル歩容生成部および幾何学的写像部とから成るものとする．

本章では，サジタル面上の挙動とラテラル面上の挙動は，動力学的に独立しているものと

し，以下では，サジタル面上での挙動に関して説明する．なお，実際には，単純モデルを用いて，それぞれの平面上で別々に歩容を生成してから，これらを合成することで 3 次元の単純モデル歩容を生成し，次いで，これに対して幾何学的写像とフルモデル補正が行う．

Fig.6.1 に，単純モデル歩容生成部，幾何学的写像部およびフルモデル補正部の間での詳細なデータフローを表す．

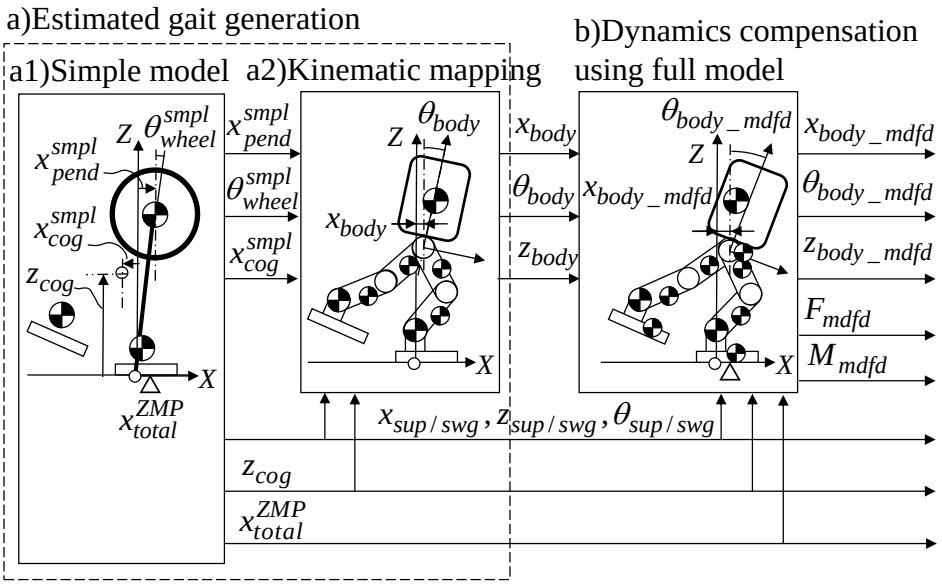
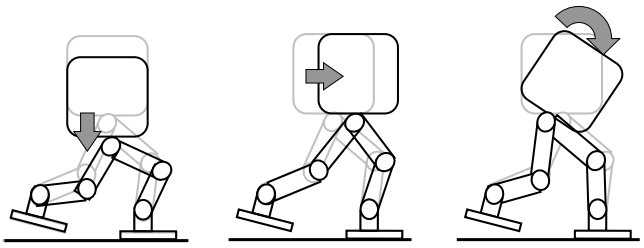


Fig.6.1 Gait compensation system

本章の単純モデル歩容生成部（Fig.6.1 の a1)では，前章と同一の手法により，水平床反力が許容範囲内に制限されるように単純モデルの運動が生成されるものとする．(必ずしも同じ手法でなければならない訳ではない.)

単純モデルと写像用モデル（幾何学的写像部用のフルモデル）とフルモデルの挙動を区別するために，本章で用いる単純モデルを改めて Fig.6.2 に示し，これに用いる表記を列挙する．



(a)Vertical Model (b)Horizontal Model (c)Rotational Model

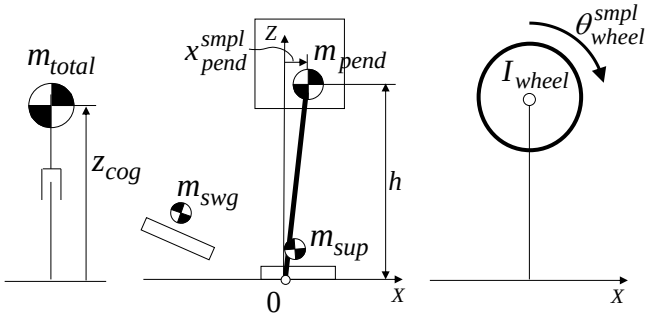


Fig.6.2 Dynamics models for running gait

x_{pend}^{smpl} : 単純モデルの倒立振子の水平位置
θ_{wheel}^{smpl} : 単純モデルのフライホイールの角度
x_{cog}^{smpl}: 単純モデルの全体重心水平位置
$m_{sup/swg}$: 単純モデルの支持脚/遊脚足部質点質量
m_{total}: 単純モデルの総質量(= $m_{pend} + m_{sup} + m_{swg}$)
（ただし，フルモデルの総質量に一致させる.）

以下は，単純モデルと写像用モデルとフルモデルとに共通に用いられるものである.
$x_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部水平位置（＝支持脚/遊脚質点水平位置）
$z_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部鉛直位置（＝支持脚/遊脚質点鉛直位置）
$\theta_{sup/swg}$: 支持脚/遊脚足部姿勢角（Fig.6.1 のみで用いる）
z_{cog}: 全体重心鉛直位置

以下は，単純モデルとフルモデルとに共通に用いられるものである.
x_{total}^{ZMP}: 目標 ZMP（近似歩容を生成するときに設定される.）

以下は，単純モデルと後述する補正用摂動動力学モデルとに共通に用いられるものである.
$\ddot{z}_{pend}$: 倒立振子鉛直加速度
m_{pend} : 倒立振子質点質量
h : 倒立振子の平均高さ（一定）
I_{wheel} : フライホイール慣性モーメント

4.3.1 節で述べたように，足部質点位置は，足首関節中心位置に設定される．議論の一般性に影響がないので，本章では，足部位置は，足部質点位置を指すものとする．

単純モデル歩容生成部では，まず，移動目的に応じて，両足部軌道（$x_{sup/swg}, z_{sup/swg}, \theta_{sup/swg}$軌道），目標 ZMP 軌道（$x_{total}^{ZMP}$軌道），全体重心鉛直位置軌道（$z_{cog}$軌道）および水平床反力の許容範囲を決定する．次いで，次の関係式より，倒立振子鉛直加速度$\ddot{z}_{pend}$を求める．

$$m_{total}\ddot{z}_{cog} = m_{pend}\ddot{z}_{pend} + m_{sup}\ddot{z}_{sup} + m_{swg}\ddot{z}_{swg} \tag{6.1}$$

最後に，倒立振子，フライホイールおよび両足部質点によって発生する床反力の目標 ZMP まわりの水平モーメントが 0 となり，かつ，同床反力の水平成分が許容範囲内に収まるように，倒立振子とフライホイールの運動（$x_{pend}^{smpl}, \theta_{wheel}^{smpl}$軌道）を決定する．なお，目標 ZMP 軌道は，歩容の継続性が保証されるように（倒立振子が発散しないように）設定されているものとする．（詳しくは，第５章を参照）

6.3 幾何学的写像部

幾何学的写像部(Fig.6.1 の a2)では，上記のように生成された単純モデル歩容（$x_{pend}^{smpl}, z_{cog}, \theta_{wheel}^{smpl}, x_{sup/swg}, z_{sup/swg}, \theta_{sup/swg}$）の瞬時値を基に，動力学的誤差が少なくなるように，近似歩容の姿勢（すなわち写像用モデルの姿勢）を，動力学的にではなく，幾何学的にマッピングすることによって決定する．本章で扱うロボットは，脚リンク機構に冗長自由度がなく，近似歩容の姿勢は，上体位置・姿勢角と両足部の位置・姿勢角との組によって表されるものとする．この時点で既に両足部の位置・姿勢角は決定されているので，幾何学的写像部では，近似歩容の上体水平位置（以降，x_{body}と表記する），上体鉛直位置（以降，z_{body}と表記する）および上体姿勢角（以降，θ_{body}と表記する）だけが新たに決定される．この決定が適切でないと，目標歩容補正部を通して最終的に得られる歩容において，元々の目標 ZMP まわりに過大な床反力モーメントが発生したり，上体軌道が発散したりする恐れがある．

歩行歩容だけを生成する場合には，簡易的な決定方法として，まずz_{body}を，滑らかに，かつ膝が曲がり過ぎたり伸び切ったりしないように決定してから，x_{body}とθ_{body}を，次式によって決定する方法が考えられる．

$$\theta_{body} = \theta_{wheel}^{smpl},\ x_{body} = x_{pend}^{smpl} + x_{offset} \tag{6.2}$$

ただし，x_{offset}は，定数であり，直立時において単純モデルの重心水平位置と写像用モデルの重心水平位置が一致するように設定される．すなわち，足部質点に対応する部位を除くロボットの重心位置(m_{pend}の位置)が，上体内に固定された，ある点に存在すると仮定する．筆者の経験では，歩行を実現する上では，この方法で十分な動力学的精度が得られることがわかっている．

走行歩容なども生成する場合には，少なくとも以下の拘束条件 1 を満足するように近似歩容の姿勢を決定するべきである．

拘束条件 1)写像用モデルの全体重心鉛直位置を，単純モデルの全体重心鉛直位置z_{cog}に一致させる．

さらに誤差を小さくするためには，式(6.2)の代わりに拘束条件 2 を満足させることが望ましい．

拘束条件 2)写像用モデルの全体重心水平位置を，単純モデルの全体重心水平位置x_{cog}^{smpl}に一致させる．

拘束条件 1 と 2 を満足すれば，近似歩容がフルモデル上で発生する床反力の並進成分は，単純モデル歩容の床反力の並進成分と一致することになる．

ここで，単純モデルに，直立停止状態から重心を真下に下げる運動（倒立振子質点を真下に下げる運動）を行わせることを考える．説明を容易にするため，写像用モデルは， Fig6.3 のように，上体質点，膝質点および足首質点から成るモデルとする．ただし，上体のイナーシャを表すために，上体は 2 質点とする．

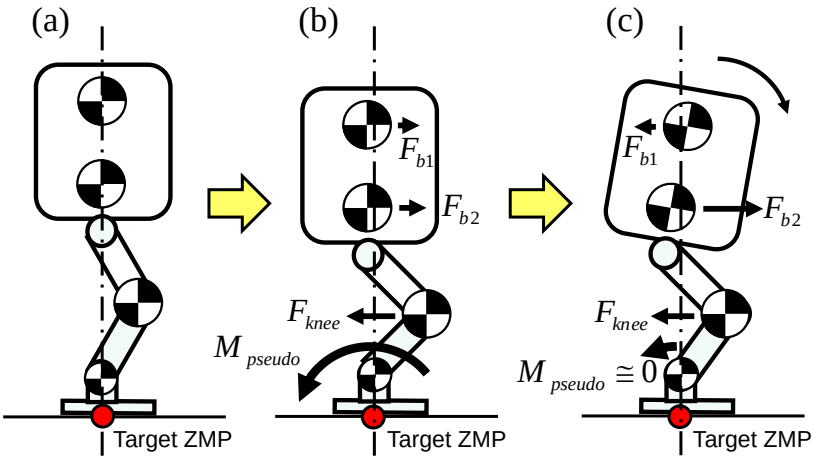


Fig.6.3 Kinematic mapping

拘束条件 1 と 2 を満足している場合には，写像用モデルの姿勢（近似歩容の姿勢）は，Fig6.3 の(a)から(b)に変化する．このとき，膝が前に移動するに伴い，拘束条件 2 を満足するために，上体は後ろに移動する．姿勢が(a)から(b)に変化し始めるときには，膝質点には，後ろ向きに慣性力F_{knee}が働き，上体には，前向きに慣性力F_{b1}とF_{b2}（ただし，$F_{b1}+F_{b2}=F_{knee}$）が働く．この結果，目標 ZMP まわりに慣性力モーメントM_{pseudo}が発生する．この例に限らず，拘束条件 1 と 2 を満足しているだけでは，膝の屈伸に伴い，写像用モデルにおいて，単純モデルで考慮していなかった全体重心まわりの角運動量変化が生じ，動力学的誤差M_{pseudo}が発

生する．この誤差は，走行のように重心の上下移動が激しい運動では極めて大きくなり，後述するフルモデル補正手法（幾何学的でなく，過去に依存した動力学的手法）だけでは十分に低減できないおそれがある．あるいは，フルモデル補正した運動が発散してしまうおそれがある．

このような運動に対しては，ヒューリスティックな手法ではあるが，直立静止姿勢(a)を基準姿勢とし，基準姿勢からの膝の屈伸に伴う膝質点等の水平移動に関した，ある適切な所定の幾何学的関係を満足するように，写像用モデルの姿勢を，姿勢(b)の全体重心位置を変えないで上体を傾けた姿勢(c)に決定すれば，動力学的誤差が低減できると考えられる．このような，動力学的誤差が低減できる所定の幾何学的関係を「擬似角運動量保存」と呼ぶ．上記例よりも一般化した擬似角運動量保存式を，付録 B に示す．擬似角運動量保存は，角運動量変化誤差（写像用モデルの全体重心まわりの角運動量変化と単純モデルの全体重心まわりの角運動量変化の差）を，動力学を用いずに低減する手法であると言える．擬似角運動量保存を拘束条件 3 とする．

拘束条件 1,2 および 3 すべてを満足するように写像用モデルの姿勢を決定することで，歩行，走行いずれにおいても，動力学的精度の高い近似歩容が得られる．ただし，歩行においても常に上体姿勢角が変動する歩容になる．

拘束条件 1,2,3 を 1 つ以上満足する上体位置・姿勢角は，解析的に求めることができないので，最急降下法などの数値最適化手法によって求めるものとする．

6.4 フルモデルを用いた目標歩容補正

目標歩容補正部(Fig.6.1 の b)は，近似歩容（写像用モデルの歩容）の上体位置・姿勢角（$x_{body}, z_{body}, \theta_{body}$）を，フルモデルと補正用摂動動力学モデルを用いて修正することにより，補正歩容の上体水平位置，上体鉛直位置および上体姿勢角（以降，それぞれx_{body_mdfd}, $z_{body_mdfd}, \theta_{body_mdfd}$と表記する）を決定する．なお，歩容生成部が決定した足部軌道は保持されるので，歩容生成部は，移動目的を達成する上で，目標歩容補正部の存在をほとんど意識する必要がない．

また，目標歩容補正部は，フルモデル上で，補正された運動につり合うように，水平床反力（Fig.6.1 のF_{mdfd}）および元々の目標 ZMP x_{total}^{ZMP}まわりに発生すべき目標床反力モーメント（Fig.6.1 のM_{mdfd}）を決定する．

補足すると，第８章で述べる制御システム（複合コンプライアンス制御）において，基本的には，補正歩容の運動と，これによって発生する床反力（F_{mdfd}とM_{mdfd}）とを目標値として，想定外の床の凹凸による影響を吸収するコンプライアンス制御が実行される．（第８章の制御システムでは，目標床反力モーメントM_{mdfd}を無視しているが，無視できない場合には，実ロボットの上体姿勢の傾き偏差を 0 に収束させるために実際のロボットの目標 ZMP まわりに作用させるべきモーメントである復元力モーメント要求値M^{dmd}（第８章で定義）にM_{mdfd}を加えればよい．）

6.5 補正用摂動動力学モデル

本章で提案する補正手法では，近似歩容（写像用モデルの歩容）の上体の水平位置と姿勢角（x_{body}, θ_{body}）を，フルモデルと補正用摂動動力学モデルを用いて補正する．補正用摂動動力学モデルとしては,補正用倒立振子モデル(Fig.6.4 左側)と補正用フライホイールモデル(Fig.6.4 右側)を用いることとする．これらの補正用摂動動力学モデルは，Fig.6.2 の単純モデルから上体運動の摂動と床反力の摂動との関係を抽出したものである．

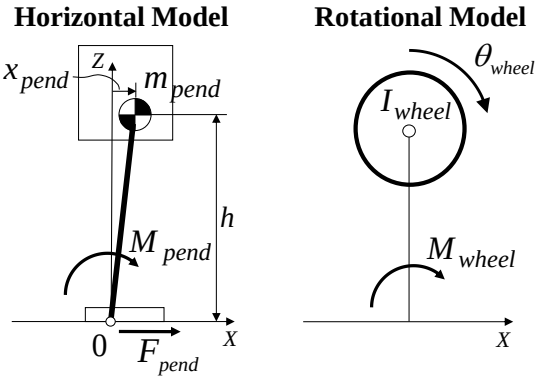


Fig.6.4 Dynamics models for compensation

6.5.1 上体水平運動成分

補正用倒立振子モデルは，上体を水平に平行移動させたときの，上体水平位置の摂動と床反力モーメントの摂動との関係を表す．以降，この摂動運動を，単に，上体水平運動と呼ぶ．

ここで，上体水平運動に関する新たな表記を列挙する．

x_{pend}: 補正用倒立振子の水平位置
M_{pend}: 補正用倒立振子モーメント
F_{pend}: 補正用倒立振子水平床反力

M_{pend}は，補正用倒立振子によって原点まわりに発生する床反力モーメントである．すなわち，倒立振子の支点が原点にあり，支点には，トルクとしてM_{pend}を発生するアクチュエータがあると考えることができる．補正用倒立振子の運動方程式は，次式のようになる．ただし，補正用倒立振子の高さの変動幅は，平均高さに比べて無視できるものとし，補正用倒立振子の高さは一定値hと近似した．

$$\ddot{x}_{pend} = \frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{h} x_{pend} + \frac{1}{h \cdot m_{pend}} M_{pend} \qquad (6.3)$$

F_{pend}は，補正用倒立振子によって発生する水平床反力であり，次式によって求められる．

$$F_{pend} = m_{pend}\ddot{x}_{pend} \tag{6.4}$$

式(6.3)(6.4)より，次式を得る．

$$F_{pend} = \frac{m_{pend}(g + \ddot{z}_{pend})}{h} x_{pend} + \frac{1}{h} M_{pend} \tag{6.5}$$

6.5.2 上体回転運動成分

補正用フライホイールモデルは，全体重心位置を変えずに上体を傾ける摂動運動に対応する動力学モデルである．以降，この摂動運動を，単に，上体回転運動と呼ぶ．

ここで，上体回転運動に関する表記を列挙する．

θ_{wheel}: 補正用フライホイール角
M_{wheel}: 補正用フライホイールモーメント
x_{wheel}: 上体姿勢角の摂動に伴う上体水平位置補正量

θ_{wheel}は，上体回転運動による上体傾き角の摂動量に相当する．M_{wheel}は，上体回転運動によってロボット全体が発生する床反力モーメントの摂動量に相当する．I_{wheel}の定義より，これらの摂動量には，次式のような比例関係が成立する．

$$M_{wheel} = I_{wheel}\ddot{\theta}_{wheel} \tag{6.6}$$

もし，上体位置を変えずに上体姿勢角だけを変えると，全体重心が前後方向に移動してしまう．そこで，重心位置を変化させないように，所定の定数C_{wheel}を用い，次式に従ってx_{wheel}だけ上体位置を水平に移動させることとする．

$$x_{wheel} = C_{wheel}\theta_{wheel} \tag{6.7}$$

ただし，定数C_{wheel}は，直立状態からお辞儀をしたときに，フルモデルの全体重心が変化しないように設定される．定数I_{wheel}は，直立状態から上述のようにお辞儀をしたときの，フルモデルの上体角加速度と床反力モーメントの関係を満足するように設定される．

フライホイールモデルが発生する水平床反力は 0 である．なお，以降，単に倒立振子と言

う場合は，補正用倒立振子モデルを指し，単にフライホイールと言う場合は，補正用フライホイールモデルを指す.

6.6 目標歩容の補正手法

本章で提案する補正手法は，次のように分類できる.

分類 1）フィードフォワード型 / フィードバック型
分類 2）水平床反力の制限あり / なし
分類 3）床反力モーメントの制限あり / なし

本章では，フィードフォワード型について，床反力の制限がない手法から，徐々に制限の多い手法へと議論を展開する．最後に，フィードバック型の概要を説明する.

6.6.1 床反力の制限がないフィードフォワード型補正手法

Fig.6.5 に，床反力の制限がないフィードフォワード型補正手法のブロック線図を示す.

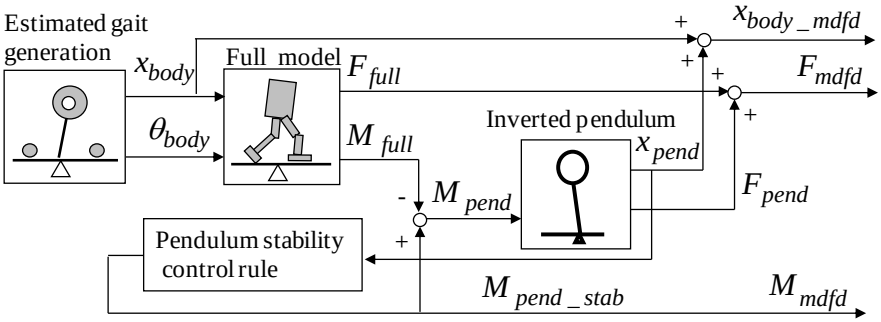


Fig.6.5 Feedforward dynamics error compensation without ground reaction force limit

ここで，本補正手法で用いる主な表記を列挙する.

M_{full}: 近似歩容の運動によってフルモデル上で目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメント
F_{full}: 近似歩容の運動によってフルモデル上で発生する水平床反力
M_{pend_stab}: 倒立振子安定化モーメント

（以下の変数は，ここで改めて定義する.）
x_{body_mdfd}: 補正歩容の上体水平位置
M_{mdfd}: 補正歩容の運動によってフルモデル上で目標 ZMP まわりに発生する目標床反力モーメント

F_{mdfd}: 補正歩容の運動によってフルモデル上で発生する水平床反力

近似歩容生成部(Fig.6.1 の a)において，目標 ZMP 軌道が適切に設定されているものと考えると，M_{mdfd}の絶対値は小さいほど望ましい．本節の手法では，M_{mdfd}の絶対値が小さくなるように，前述の倒立振子を用いることによって，近似歩容の上体運動を補正する．以下では，上記ブロック線図を用いながら，本手法の手順を説明する．

STEP1）6.3 節で述べたように近似歩容を生成する．

STEP2）近似歩容の運動をフルモデルに入力する．フルモデルでは，逆キネマティクス演算によって各関節角が算出され，さらに，動力学演算によってM_{full}とF_{full}が算出される．

STEP3）倒立振子安定化制御則によって，x_{pend}を安定化するための倒立振子安定化モーメントM_{pend_stab}を決定する．この制御則の詳細を，付録 C に示す．

STEP4）M_{full}を打ち消すと共に倒立振子を安定化するために，M_{pend}を次式のように決定する．

$$M_{pend} = -M_{full} + M_{pend_stab} \tag{6.8}$$

STEP5）式(6.3)(6.5)により，x_{pend}とF_{pend}を算出する．

STEP6）x_{body_mdfd}を，次式によって決定する．

$$x_{body_mdfd} = x_{body} + x_{pend} \tag{6.9}$$

STEP7）近似歩容が特異姿勢（膝が伸び切った姿勢）から十分に離れているならば，補正された歩容が発生する床反力は，実質的には，摂動運動に対応する床反力分だけ増加すると考えられる．したがって，M_{mdfd}に関しては，近似的に次式が成立すると考えられる．

$$M_{mdfd} = M_{full} + M_{pend} \tag{6.10}$$

式(6.8)(6.10)より，次の関係を得る．

$$M_{mdfd} = M_{pend_stab} \tag{6.11}$$

また，F_{mdfd}に関しても，近似的に次式が成立すると考えられる．

$$F_{mdfd} = F_{full} + F_{pend} \tag{6.12}$$

そこで，M_{mdfd}とF_{mdfd}を，式(6.11)(6.12)に従って求めることとする．

以上の手順によって，歩容が補正される．

本手法では，長阪[14]の動力学フィルタと同様，補正用の倒立振子の挙動に応じて上体の水平運動を補正することによって，近似歩容の動力学的誤差であるM_{full}（動力学フィルタでは ZMP 誤差）を打ち消すものである．ただし本手法は，長阪[14]の動力学フィルタと比較して，補正用の倒立振子が鉛直床反力の変化に対応できるように拡張されている．また，長阪[14]の動力学フィルタでは，補正用倒立振子を安定化しつつ，補正用倒立振子の運動に対応する ZMP の摂動量が，ZMP 誤差の(-1)倍に追従するように，補正用倒立振子の支点の速度を操作する積分型のフィードバック制御となっているのに対し，本手法では，式(6.8)のように，補正用倒立振子モーメント M_{pend}を操作量とし，動力学的誤差$(-M_{full})$を直接的に打ち消すフィードフォワード項と補正用倒立振子を安定化するフィードバック項から成る制御系となる．したがって，鉛直床反力が変化する場合でも，付録 C に示すように，ゲイン設計が比較的容易になる．

付録 C に示す制御則によって，M_{mdfd}の波形は，M_{full}をハイカットフィルタとローカットフィルタに通したような波形になり，M_{mdfd}の変動をM_{full}の変動よりも小さくすることができる．（歩行に関しては，4.5.1 節で本補正の効果を定量的に示した．）

6.6.2 水平床反力を許容範囲に制限する補正手法

前節の手法に水平床反力の制限機能を追加した補正手法のブロック線図をFig.6.6に示す．

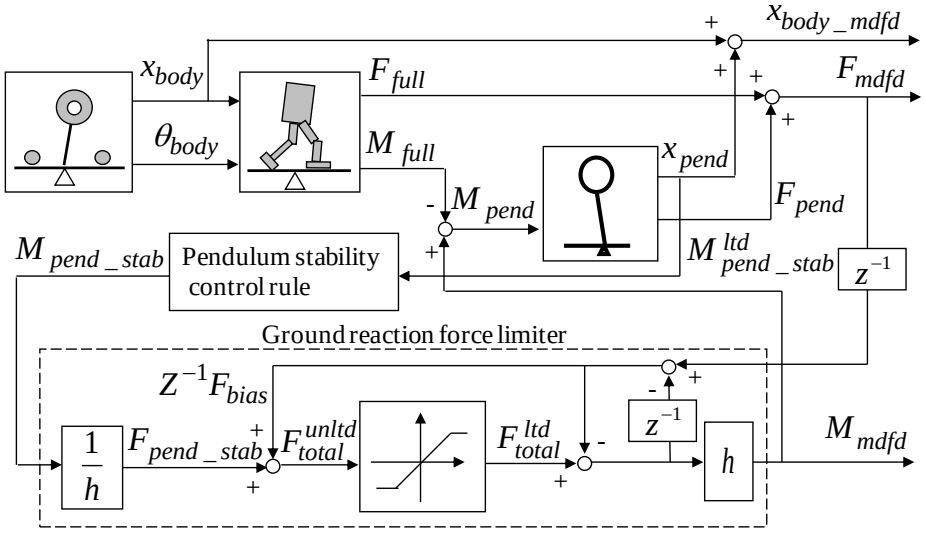


Fig.6.6 Feedforward dynamics error compensation with horizontal ground reaction force limit

ここで，本補正手法で用いる主な新たな表記を列挙する．

$M_{pend_stab}^{ltd}$: 制限付き倒立振子安定化モーメント
$[F_{min}, F_{max}]$: 水平床反力の許容範囲（鉛直床反力に応じて設定される）

本手法は，前述の倒立振子安定化制御則（付録 C）によって決定した倒立振子安定化モーメントM_{pend_stab}をそのまま用いた場合のF_{mdfd}の値を予測し，予測した値が上記許容範囲を越える場合には，越えないようにM_{pend_stab}を修正する手法である．なお，想定する床の摩擦係数をμとすると，許容範囲は，例えば，前後方向，左右方向共に，$[-w\mu F_z, w\mu F_z]$(ただし，F_zは目標歩容の床反力鉛直成分，w は 1 より小さい正の係数)とする．本手法と同様，目標 ZMP まわりの床反力モーメントの鉛直成分（以降，鉛直床反力モーメントと略す）も，床反力鉛直成分と摩擦係数の積に比例した許容範囲に制限されるものとする．すなわち，前後床反力，左右床反力および鉛直床反力モーメントの許容範囲は，これらを座標軸とする直交座標系で表すと直方体となる．一方，最大摩擦力は，鉛直床反力モーメントの軸を法線とし原点を含む断面が半径μF_zの円となる閉曲面で表されると考えられる．したがって，直方体がこの閉曲面に包まれるように，マージンを持たせて各係数を設定することが望ましい．

以下では，離散化されたシステムにおいて，リアルタイムにF_{mdfd}を予測する方法を議論する．

式(6.12)の右辺第 2 項F_{pend}は，式(6.5)の関係からわかるように，M_{pend_stab}に関する直達項M_{pend_stab}/hと非直達項とから成る．一方，式(6.12)の右辺第 1 項F_{full}は，M_{pend_stab}に関する非直達項しかない．したがってF_{mdfd}は，次式のように，M_{pend_stab}に関する直達項M_{pend_stab}/hと非直達項との和で表される．

$$F_{mdfd} = M_{pend_stab}/h + F_{bias} \tag{6.13}$$

ただし，F_{bias}は，F_{mdfd}のうちの非直達項を表す．

今回周期での非直達項F_{bias}は，サンプリング周期が十分に短ければ，前回周期での非直達項$z^{-1}F_{bias}$とほぼ一致すると考えられる．したがって，F_{mdfd}の予測値をF_{total}^{unltd}とすると，F_{total}^{unltd}は，次式によって求めることができる．

$$F_{total}^{unltd} = M_{pend_stab}/h + z^{-1}F_{bias} \tag{6.14}$$

ただし，$z^{-1}F_{bias}$は，$z^{-1}F_{mdfd}$と$z^{-1}M_{pend_stab}$とから，式(6.13)の関係により求める．

本補正手法では，倒立振子に式(6.8)で決定されるM_{pend}を与えたときのF_{mdfd}の予測値F_{total}^{unltd}を，上述のように算出する．次いで，$[F_{min}, F_{max}]$を超えないようにF_{total}^{unltd}に制限を掛け，得られた値をF_{total}^{ltd}とする．次いで，F_{mdfd}の予測値がF_{total}^{ltd}となるように，次式によって，制

限付き倒立振子安定化モーメント$M_{pend_stab}^{ltd}$を求める.

$$M_{pend_stab}^{ltd} = h(F_{total}^{ltd} - z^{-1}F_{bias}) \tag{6.15}$$

次いで，M_{pend}を次式により決定する.

$$M_{pend} = -M_{full} + M_{pend_stab}^{ltd} \tag{6.16}$$

また，補正歩容の床反力モーメントM_{mdfd}としては，$M_{pend_stab}^{ltd}$が出力される．それ以外は，Fig.6.5 の手法と同様である.

Fig.6.6 において，リミッタへの入力F_{total}^{unltd}が$[F_{min}, F_{max}]$を超えない場合には，リミッタの前後にある 2 つの加算点が互いに打ち消し合い，Fig.6.6 は Fig.6.5 と一致する.

リミッタへの入力F_{total}^{unltd}がF_{max}を超える場合には，Fig.6.6 の点線部分は，M_{mdfd}を求める際に，M_{mdfd}の前回値を今回値に加算する積分器を含む系になるので，連続系に変換することにより Fig.6.7 と等価になる．すなわち，F_{mdfd}がF_{max}に追従するように，積分型のフィードバック制御系が形成される．同様に，リミッタへの入力F_{total}^{unltd}がF_{min}未満の場合は，F_{mdfd}がF_{min}に追従するように，積分型のフィードバック制御系が形成される.

以上のように，この手法では，前節の手法の機能に加えて，運動によって発生する水平床反力が許容範囲内に制限される.

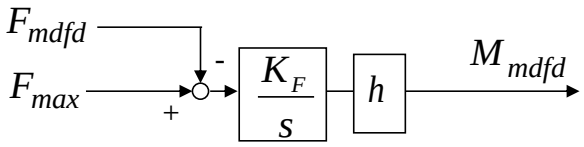


Fig.6.7 Equivalent system of ground reaction force limiter when F_{total}^{unltd} exceeding F_{max}

6.6.3 水平床反力と床反力モーメントを許容範囲に制限する補正手法

前節の手法に，さらに目標 ZMP まわりの床反力モーメントを許容範囲に制限する機能を付加した補正手法のブロック線図を Fig.6.8 に示す．本手法では，単純モデルの上体運動に，倒立振子とフライホイールの運動が加えられることによって，上体運動が補正される.

Fig.6.8 内のフライホイール安定化制御則は，フライホイールの角度θ_{wheel}を 0 に収束させるためのモーメント（以降，M_{wheel_stab}と表記する）を決定するものとする．この安定化制御則は，θ_{wheel}に関する PD 制御などで構わない．Fig.6.8 内のリミッタ付き分配器は，

$M_{pend_stab}, M_{wheel_stab}$および$z^{-1}F_{mdfd}$を入力し，$M^{ltd}_{pend_stab}$と制限されたフライホイールモーメント（以降，$M^{ltd}_{wheel_stab}$と表記する）を出力する．

M_{full}を打ち消すと共に倒立振子とフライホイールを安定化するために，M_{pend}は式(6.16)により決定し，M_{wheel}は次式により決定するものとする．

$$M_{wheel} = M^{ltd}_{wheel_stab} \tag{6.17}$$

6.6.1 節 STEP7 と同様の議論により，補正歩容の床反力モーメントに関して，次式が近似的に成立すると考えられる．

$$M_{mdfd} = M_{full} + M_{pend} + M_{wheel} \tag{6.18}$$

式(6.16)(6.17)(6.18)より，M_{mdfd}は次のようになる．

$$M_{mdfd} = M^{ltd}_{pend_stab} + M^{ltd}_{wheel_stab} \tag{6.19}$$

一方，F_{mdfd}に関しては，前節の手法と同様の関係が成立する．

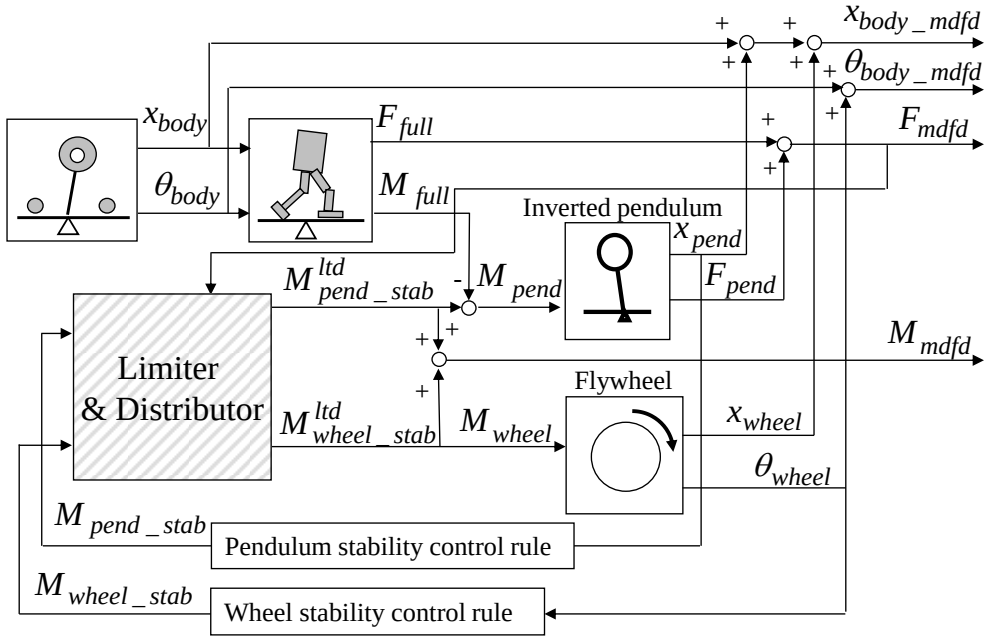


Fig.6.8 Feedforward dynamics error compensation with horizontal ground reaction force and moment limits

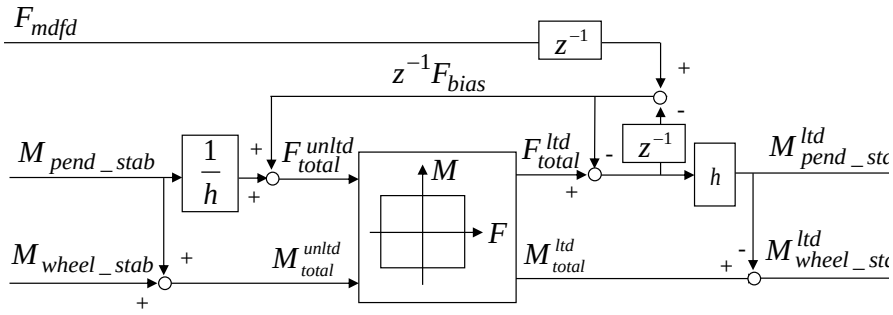


Fig.6.9 Force and moment limiter and distributor

Fig. 6. 9 に，リミッタ付き分配器のブロック線図を示す．リミッタ付き分配器は，まず，リミッタによる制限を掛けなかった場合のF_{mdfd}とM_{mdfd}の予測値（以降，$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$と表記する）を，式(6. 14)(6. 19)により求める．ただし，式(6. 19)においては，$M_{pend_stab}^{ltd}, M_{wheel_stab}^{ltd}$の代わりに，それぞれ$M_{pend_stab}, M_{wheel_stab}$を用いる．次いで，後述する 2 次元リミッタに$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$を入力し，許容範囲を超えないようにリミッタの出力（以降，$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$と表記する）を決定する． 最後に，$(F_{mdfd}, M_{mdfd})$を$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$に一致させるために，式(6. 14)(6. 19)の関係に基づいて，Fig. 6. 9 のように，$M_{pend_stab}^{ltd}$と$M_{wheel_stab}^{ltd}$を求める．

以上の手順によって，(F_{mdfd}, M_{mdfd})が許容範囲を超えないように歩容が補正される．

6.6.4 2 次元リミッタ

許容範囲は，Fig. 6. 10 の長方形の領域で表されるものとする．2 次元リミッタは，入力$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$に対して，出力$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$を，次の条件を可能な限り満足するように決定する．

条件 1）$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$を許容範囲内に存在させる．
条件 2）$M_{wheel_stab}^{ltd}$と$M_{wheel_stab}^{unltd}$の差の絶対値を最小にする．
条件 3）$M_{pend_stab}^{ltd}$と$M_{pend_stab}^{unltd}$の差の絶対値を最小にする．

ただし，条件 1, 2, 3 の順に優先順位が高いものとする．条件 2 を条件 3 よりも優先することによって，x_{pend}が 0 に復元することよりもθ_{wheel}が 0 に復元することが優先される．

以下に，Fig. 6. 10 を用いて，具体的に 2 次元リミッタの動作を説明する．

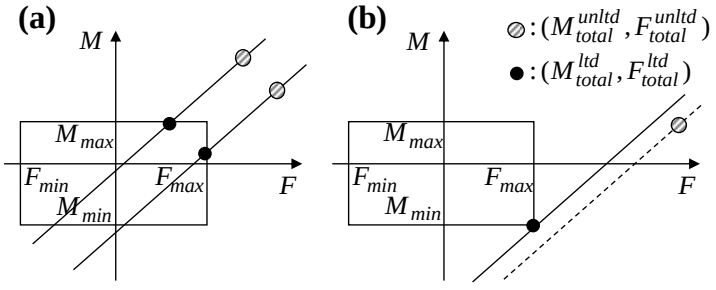


Fig.6.10 Modification of force and moment by limiter

$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$が許容範囲内にある場合には，$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$を$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$に一致させる．その他の場合には，Fig. 6. 10(a)に示すように，点$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$を通る傾き$h$の直線と許容範囲の境界線との交点の内で最も$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$に近い点の座標を$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$として決定する．式(6. 15)(6. 19)の関係より，このことは，$M_{wheel_stab}^{ltd}$をM_{wheel_stab}に一致させたまま，$M_{pend_stab}^{ltd}$だけを最小限に修正して，許容範囲を満足させることを意味する．ただし，Fig. 6. 10(b)のように交点が存在しない場合には，許容範囲の境界線上の点のうちで，点$(F_{total}^{unltd}, M_{total}^{unltd})$を通る傾き$h$の直線から最も近い点の座標を$(F_{total}^{ltd}, M_{total}^{ltd})$として決定する．このことは，$M_{wheel_stab}^{ltd}$の修正量を最小限にして，許容範囲を満足させることを意味する．

なお，F_{mdfd}の許容範囲は，前述のように，摩擦限界から十分に余裕を持って設定されるものとする．また，M_{mdfd}の許容範囲は，目標 ZMP と支持多角形を基に，M_{mdfd}を目標 ZMP まわりに作用させても足底が離れにくいように決定されるものとする．したがって，いずれの範囲も，目標歩容の床反力鉛直成分に依存する．特に，走行の滞空期においては，床反力鉛直成分が 0 であるので，いずれの許容範囲も [0, 0]と設定され，F_{total}^{ltd}とM_{total}^{ltd}は 0 となる．すなわち，ロボット全体重心は放物運動を行い，重心まわりの角運動量は保存される．

6.6.5 フィードバック型補正手法

本節では，補正用摂動動力学モデルの運動をフルモデルにフィードバックする手法を提案する．以降，前節の手法を FF 型補正手法，本節の手法を FB 型補正手法と略す.

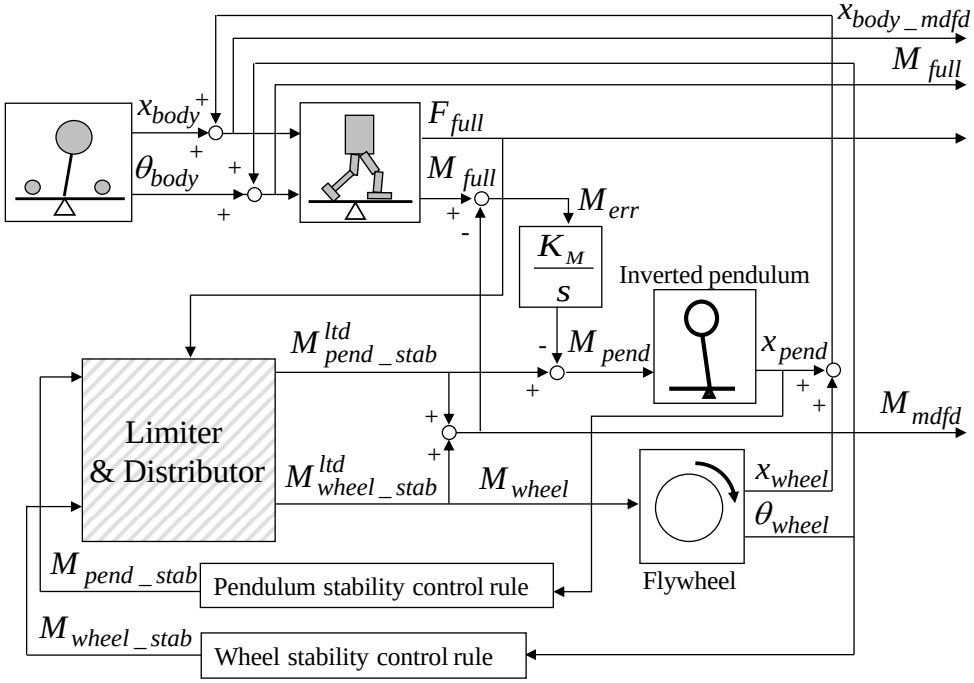


Fig.6.11 Feedback dynamics error compensation

Fig. 6. 11 に，FB 型補正手法のブロック図を示す．前節の手法と同様，本手法においても，元々の目標 ZMP まわりに$(M_{pend_stab}^{ltd} + M_{wheel_stab}^{ltd})$が発生するように歩容が補正される．本節

の手法でのM_{full}は，前節の定義とは異なり，補正歩容の運動をフルモデルに入力することによって算出される，元々の目標 ZMP まわりの床反力モーメントである．したがって，次式のように，本節でのM_{full}と目標床反力モーメントM_{mdfd}との差を，モーメント誤差M_{err}と定義すると，M_{err}は 0 となるべきである．

$$M_{err} = M_{full} - M_{mdfd} \tag{6.20}$$

本節の手法では，Fig.6.11 に示すように，$K_M M_{err}$（ただし，K_Mは積分ゲイン）の積分値を倒立振子入力にフィードバックすることによって，M_{err}を 0 に収束させている．なお，フルモデルが後退差分のような遅れの少ない表現になっていれば、フルモデルの摂動分の伝達関数は，1 サンプリング時間の無駄時間系に近似できる．したがって，ゲインK_Mは，サンプリング時間分の 1 または，それより若干小さめに設定すればよい．

FB 型補正手法では，補正用摂動動力学モデルがフィードバックループ内に含まれるので，FF 型補正手法に比べて，補正用摂動動力学モデルの近似誤差が補正歩容の動力学的誤差（補正歩容の運動を基にフルモデルを用いて算出した床反力と補正された目標床反力（F_{mdfd}，M_{mdfd}）との差）に及ぼす影響が低減される．

一方，FF 型補正手法は，歩容補正の応答性が高い．ただし，FB 型補正手法と FF 型補正手法との間の特性の差は，わずかである．後述する歩容生成の例においては，M_{mdfd}を低減する効果(フィルタ的効果)を高めるために，補正手法を 2 段直列にしたが，両者の特徴を活かすために，FF 型補正手法と FB 型補正手法を併用した．すなわち，FF 型補正手法で得られた補正歩容の運動と元々の目標 ZMP 軌道とを FB 型補正手法に入力することで，最終的な補正歩容を求めるようにした．なお，FF 型補正手法と FB 型補正手法のいずれかだけを用いて 2 段直列の補正構成にしても，実用上は問題ない．

6.7 歩容補正シミュレーションと走行実験

本節では，ASIMO Ver.2（質量 54[kg]）[21]の詳細パラメータを基に，提案する手法を用いて歩容補正を行った結果を示す．補正の効果が比較できるように，Fig.6.12 に示すシミュレーションシステムを構成した．単純モデルにおける倒立振子質点質量と総質量との比(m_{pend}/m_{total})は 0.82，倒立振子の高さhは 0.803[m]とし，制御周期は 5[ms]とした．

Fig.6.12 において，α_0は，単純モデルの倒立振子の水平位置x_{pend}^{smpl}とフライホイールの角度θ_{wheel}^{smpl}を基に，6.3 節で述べた幾何学的写像部の拘束条件 1)2)3)すべてを満足するように，最急降下法によって求めた運動（写像用モデルの姿勢の時系列）である．β_0は，式(6.2)(6.7)によって求めた運動である．α_1は，運動α_0を 6.6.3 節の FF 型手法によって補正した運動である．α_2は，運動α_1を 6.6.5 節の FB 型手法によって補正した運動である．

Fig.6.13 と Fig.6.14 に，6[km/h]走行時の運動$\beta_0, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$に対するフルモデル上での目標 ZMP まわりの床反力モーメントと水平床反力を示す．許容範囲の上下限値は，鉛直床反力に比例させた．運動α_0では，運動β_0に比べ，目標 ZMP まわりの床反力モーメントが小さく，水平

床反力が許容範囲から逸脱する量も低減している．このことから，幾何学的写像部の拘束条件 1)2)3)すべてを満足させることで，近似歩容の動力学的精度が大幅に向上することが分かる．運動α_1では，床反力モーメントが運動α_0に比べて小さくなり，水平床反力は，ほぼ許容範囲に収まっている．さらに運動α_2では，運動α_1に比べ，床反力モーメントが数分の 1 に小さくなり，水平床反力も浮遊期において低減し，それぞれ，ほぼ許容範囲に収まっている．このことから，補正を 2 段にすることで，効果がより一層高まることが分かる．なお，水平床反力と床反力モーメントに，45Hz 程度の振動が見られるが，これは，M_{err}の低周波数成分を極力小さくするために，積分ゲインK_Mをサンプリング時間分の 1 に設定したためである．この振動成分は，フルモデルの非線形成分によるものであり，経験上，振動が発散することはない．また，実機の姿勢安定化制御の帯域(数 Hz 以下)を大きく超えているので，実用上問題ない．

ところで，滞空期においては，水平床反力と床反力モーメントが，ほぼ 0 になっている．このことは，滞空期と接地期を区別することなく統一的に補正できていることを意味する．

Fig.6.15 に，上記 6[km/h]走行時の各モデルの挙動を示す．最上段は，運動β_0の上体水平位置と上体姿勢角（破線），運動α_2の上体水平位置と上体姿勢角（実線）である．2 段目は，運動α_0の上体水平位置と運動β_0の上体水平位置との差と，運動α_0の上体姿勢角と運動β_0の上体姿勢角との差であり，これらは，言い換えると，幾何学的写像部の拘束条件 1)2)3)すべてを満足させるための上体水平位置と上体姿勢角の補正量である．3 段目は，FF 型補正手法の倒立振子水平位置とフライホイールの角度，4 段目は，FB 型補正手法の倒立振子の水平位置とフライホイールの角度である．

α_2の上体姿勢角とβ_0の上体姿勢角との差は，2 段目以下の角度の和に等しい．しかし，式（7）のようにフライホイールの角度に応じて上体水平位置が補正されるため，α_2の上体水平位置とβ_0の上体水平位置との差は，2 段目以下の水平位置の和に一致しない．

2 段目以下を比較すると，拘束条件 1)2)3)すべてを満足させるための補正量が最も大きい．特に，上体姿勢角補正量は，運動β_0の上体姿勢角（すなわち，単純モデルのフライホイールの角度θ_{wheel}^{smpl}）に対しても 1 桁くらい大きい．なお，FF 型補正手法の倒立振子水平位置に偏りがあるが，これは，倒立振子安定化制御則（付録 C）の目標位置x_{pend}^{target}が，M_{full}の偏りを低減するように決定されるためである．

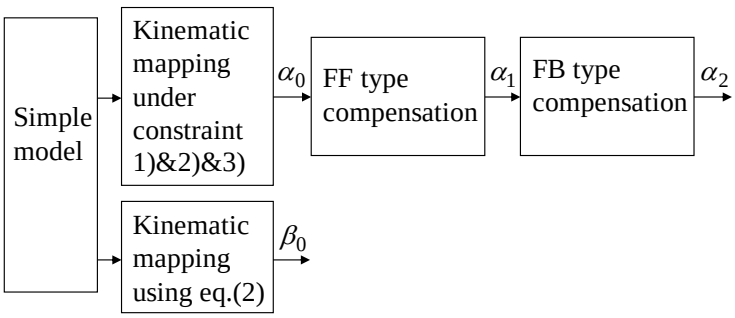


Fig.6.12 Simulation system

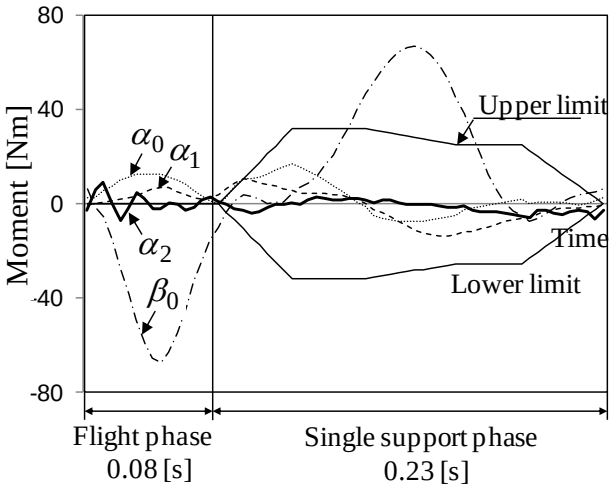


Fig.6.13 Moment of running at 6[km/h]

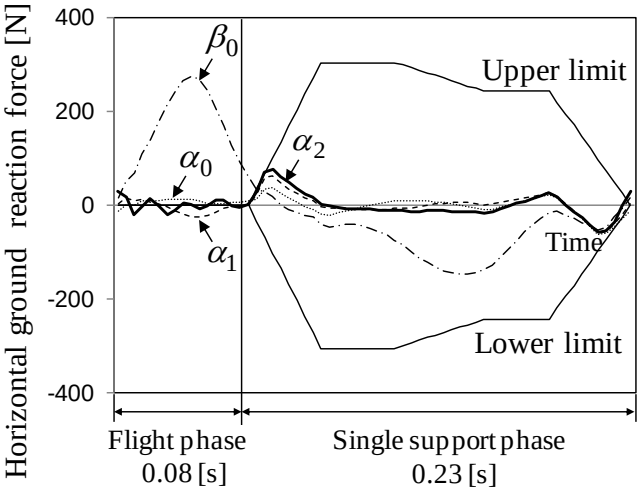


Fig.6.14 Horizontal ground reaction force of running at 6[km/h]

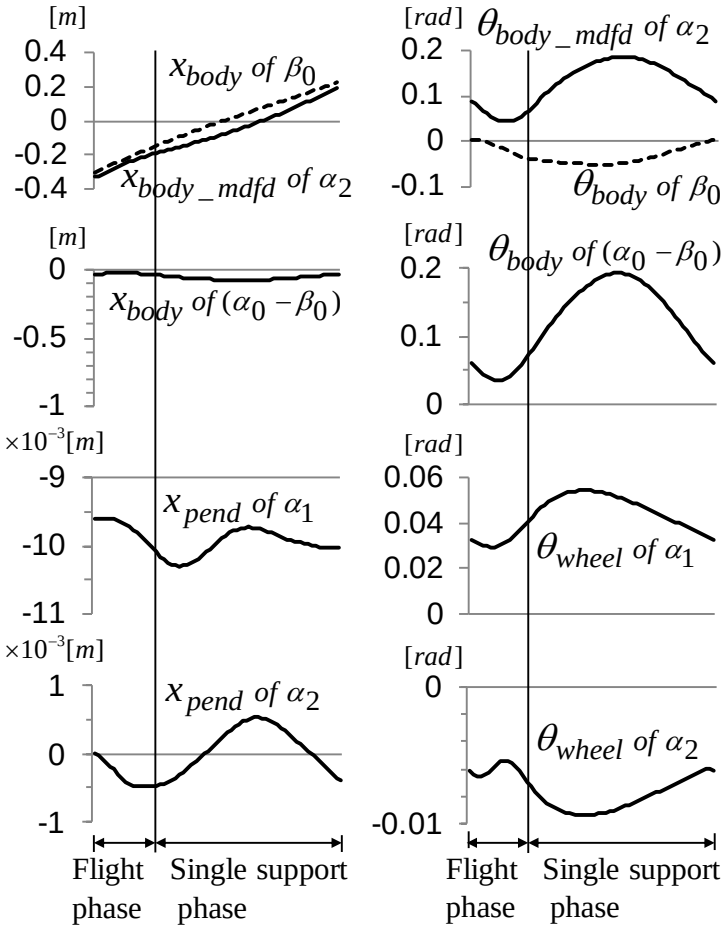


Fig.6.15 Trajectories of inverted pendulum and flywheel model during running at 6[km/h]

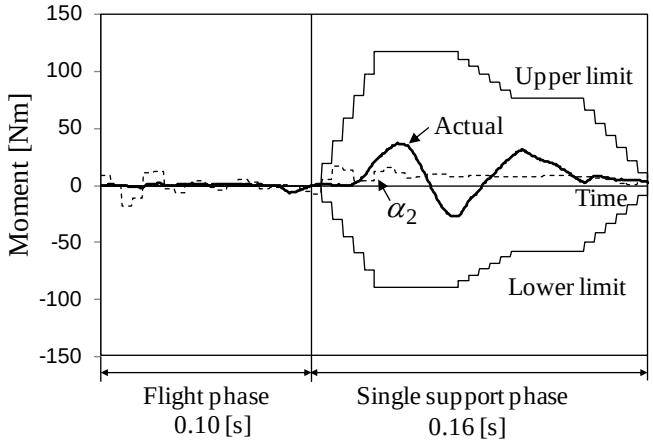


Fig.6.16 Moment of running at 9[km/h]

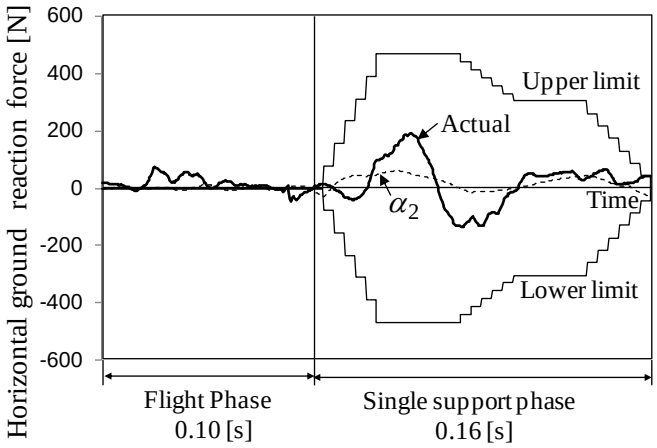


Fig.6.17 Horizontal ground reaction force of running at 9[km/h]

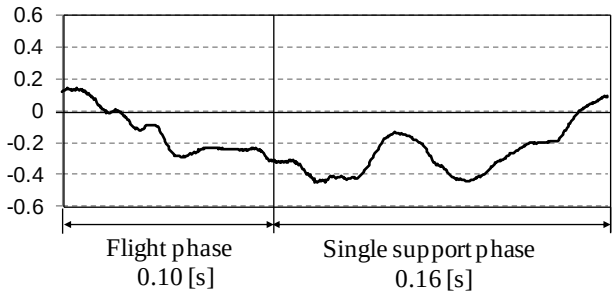


Fig.6.18 Inclination of running at 9[km/h]

Fig.6.16 と Fig.6.17 に，9[km/h]走行における運動α_2の床反力(点線)と，この運動を目標として姿勢安定化制御を行った実際の ASIMO Ver.3 (Fig.5.11) (質量 45[kg]) の床反力(太実線．足部に搭載された 6 軸力センサの検出値から算出)を示す．Fig.6.18 には，このときの ASIMO の上体傾き角偏差を示す．接地期において，実際の床反力および上体傾き角偏差に 18Hz 程度の振動が見られるが，ロボットの剛性から推察すると，これは，ロボット全体に，接地点を節とする高次の曲げ変形モードの振動が発生しているためであると考えられる．この振動を含めても，上体傾き偏差は p-p0.6[°]程度に収まっている，また，実際の水平床反力と床反力モーメントは，十分な余裕を持って許容範囲を満足しており，安定マージンの高い走行が実現できている．

6.8 まとめ

本章では，フルモデル上で発生する目標 ZMP まわりの床反力モーメントが低減され，かつ，水平床反力と目標 ZMP まわりの床反力モーメントが許容範囲を越えないように，補正用倒立振子モデルと補正用フライホイールモデルを用いて，近似歩容の上体位置と姿勢角を補正する手法を提案し，その有効性をシミュレーションと実機走行結果により示した．本手法を走行に適用する場合，水平床反力の許容範囲を鉛直床反力に応じて適切に決定することによって，スリップしにくいように歩容が補正される．滞空期においては，水平床反力と目標 ZMP まわりの床反力モーメントの許容範囲を，共に 0 に設定するだけで，全体重心が放物運動を行い，重心まわりの角運動量が保存されるように，運動が補正される．

第７章．初期の歩行制御システムと姿勢安定化制御

第７章．初期の歩行制御システムと姿勢安定化制御

7.1 はじめに

本章では，1990 年頃の 2 脚ロボット E4，E5 に導入した初期の歩行制御システムについて述べる．7.2 節では，本制御システムの構成と機能の概要を述べ，7.3 節では，姿勢安定化において重要な役目を担う床反力制御に関して，E3（姿勢制御なし）から ASIMO までの開発の変遷を述べる．7.4 節では，初期の床反力制御である足首コンプライアンス制御の詳細を述べ，7.5 節でその問題点を示す．この問題点を解決するために開発された複合コンプライアンス制御については，次章で述べる．

7.2 初期の制御システムの構成

Fig.7.1 に，初期の制御システムの機能ブロック図を示す．本システムは，歩容生成部（Target gait generator）と姿勢安定化制御部（Posture stability controller）から成る．さらに，姿勢安定化制御部は，復元力モーメント要求値決定部（Determinator of restoring moment demand），床反力制御部（GRF controller），追従制御部（Tracking controller）から成る．

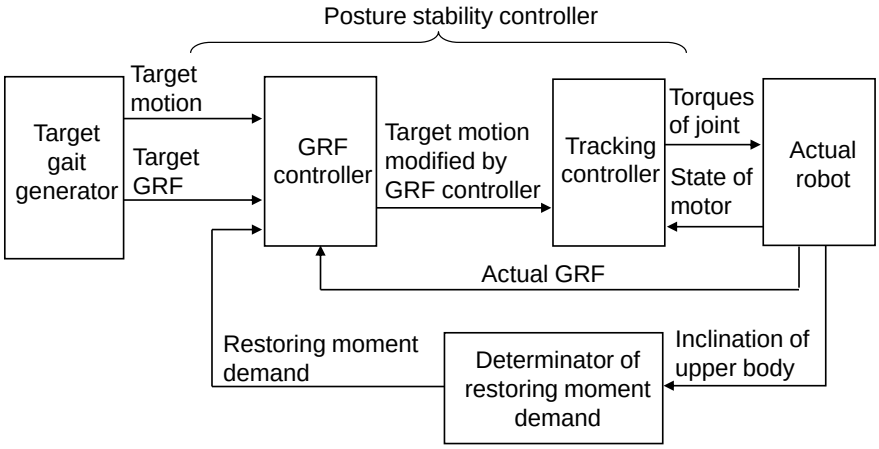


Fig.7.1 Basic control system

以下に，各部の機能の概要を説明する．

歩容生成部は，歩容パラメータを基に，ロボットの動力学モデルを用いて，制御周期毎に目標歩容の瞬時値を算出する．（ただし，E4 までは，CPU 能力の制約上，あらかじめ設計しておいた目標歩容の関節角の時系列を記憶していた．）

復元力モーメント要求値決定部は，上体傾き偏差（実上体傾きと目標上体傾きとの差）に応じて，復元力モーメント要求値を決定する．

床反力制御部は，目標 ZMP まわりの実床反力モーメントが復元力モーメント要求値になるように，目標関節角を修正する．鉛直床反力が一定とみなすことができるならば，このことは，復元力モーメント要求値を鉛直床反力で割った値だけ，実 COP を目標 ZMP からずらすことになるので，床反力制御部は，実 COP を操作する制御であるとも言える．

追従制御部は，床反力制御部によって修正された目標関節角に実関節角が追従するように，

モータの電流を制御する．

7.3 床反力制御の開発経緯

筆者が関わってきた床反力制御（すなわち，上述の床反力制御部）の開発経緯について，その概略を以下に紹介する．

2 脚ロボット E3 までは，前述のような足部柔軟構造はなく，硬質アルミの足部の足底に，床との摩擦を高めるための厚さ 1[㎜]程度の硬いゴムシートが貼られていただけであった．E3 では，目標歩容としてあらかじめ作成しておいた目標関節角パターンに追従するように関節が変位制御されるだけで，姿勢安定化制御は行われていなかった．E3 は，傾きが 0.2° 以下に調整された定盤の上でならば，3[km/h]で歩行することができたが，数[㎜]程度の凹凸や段差があると，転倒する場合があった．

前述の足部柔軟構造（ガイド付きゴムブッシュと発泡ゴムインナーソール）は，足首関節角操作によるコンプライアンス制御（以降，足首コンプライアンス制御と呼ぶ）と同制御をベースとした姿勢安定化制御と共に，1990 年に，2 脚ロボット E4(Fig.7.2)に初めて導入された．この結果，単発的ならば，数[㎜]程度の凹凸や段差を通過できるようになったが，両脚支持期での姿勢の収束性が低いことなどから，数[㎜]程度の凹凸や段差を連続して踏むと転倒する場合があった．

1994 年には，2 脚ロボット E6 に，脚のすべての関節を協調させて，両脚支持期でも高い姿勢安定性が確保できる“複合コンプライアンス制御”が導入された．本論文の実験で用いられる ASIMO にも，同制御が組み込まれている．

以下では，まず，足首コンプライアンス制御を用いた姿勢制御に関して，技術の詳細，効果および問題点を示す．

Fig.7.2 Biped robot E4

7.4 足首コンプライアンス制御

以下に，本節で用いる表記を列挙する．

（なお，支持脚/遊脚用を明示するために，添え字“_sup/swg”を付ける場合もある．）

目標歩容用：

$\theta_{body_incl}^{gait}$: 目標歩容の上体傾き角

$\omega_{body_incl}^{gait}$: 目標歩容の上体傾き角速度（$\theta_{body_incl}^{gait}$の微分値）

θ_{ankle}^{gait}: 目標歩容足首角

ω_{ankle}^{gait}: 目標足首角速度

実状態量：

$\theta_{body_incl}^{act}$: 実上体傾き角

$\omega_{body_incl}^{act}$: 実上体傾き角速度（θ_{incl}^{act}の微分値）

θ_{ankle}^{act}: 実足首角度

ω_{ankle}^{act}: 実足首角速度

姿勢制御用：

K_{θ_incl}: 上体傾き角ゲイン

K_{ω_incl}: 上体傾き角速度ゲイン

w: 姿勢制御ゲイン用重み

M^{dmd}: 復元力モーメント要求値（姿勢安定化のために追加すべき床反力モーメント）

θ_{stab}: 姿勢安定化足首角修正量（姿勢安定化のために目標歩容足首角に加えるべき修正量）

コンプライアンス制御用：

K_{cmpl}: コンプライアンス制御ゲイン

T_{cmpl}: コンプライアンス制御時定数

P_{foot}: 足底基準点（具体的には，各脚の足首中心から足底に降ろした垂線と足底の交点）

M_{foot}^{gait}: 目標歩容の脚床反力モーメント（各脚に関して，目標歩容から算出される足底基準点P_{foot}まわりの目標脚床反力モーメント）

M_{foot}^{act}: 実脚床反力モーメント（各脚に関して，その脚の足底基準点まわりに作用する実脚床反力モーメント）

M_{foot}^{filt}: 実脚床反力モーメントのローパスフィルタ値

θ_{cmpl}: コンプライアンス制御足首角修正量（コンプライアンス制御による足首角修正量）

θ_{ankle}^{mdfd}: 修正目標足首角

足首変位制御用：

K_{p_ankle}：　足首角度ゲイン（出力軸換算）[(rad/s)/rad]

K_{v_ankle}：　足首角速度ゲイン（出力軸換算）[Nm/(rad/s)]

τ_{ankle}：　足首アクチュエータ出力トルク（出力軸換算）[Nm]

パラメータ：

I_m：足首アクチュエータイナーシャ（出力軸換算）[kgm^2]

K_{foot}：　足部柔軟構造の剛性（ゴムブッシュと発泡ゴムインナーソールを合わせた曲げ剛性）

θ_{ground}^{err}：　床傾き偏差（想定していた床に対する実際の床の相対傾き）

Fig. 7. 3 に, 足首コンプライアンス制御をベースとした姿勢安定化制御のシステム概略図を示す．本システムは，姿勢安定化制御部，足首コンプライアンス制御部および変位制御部から成る．

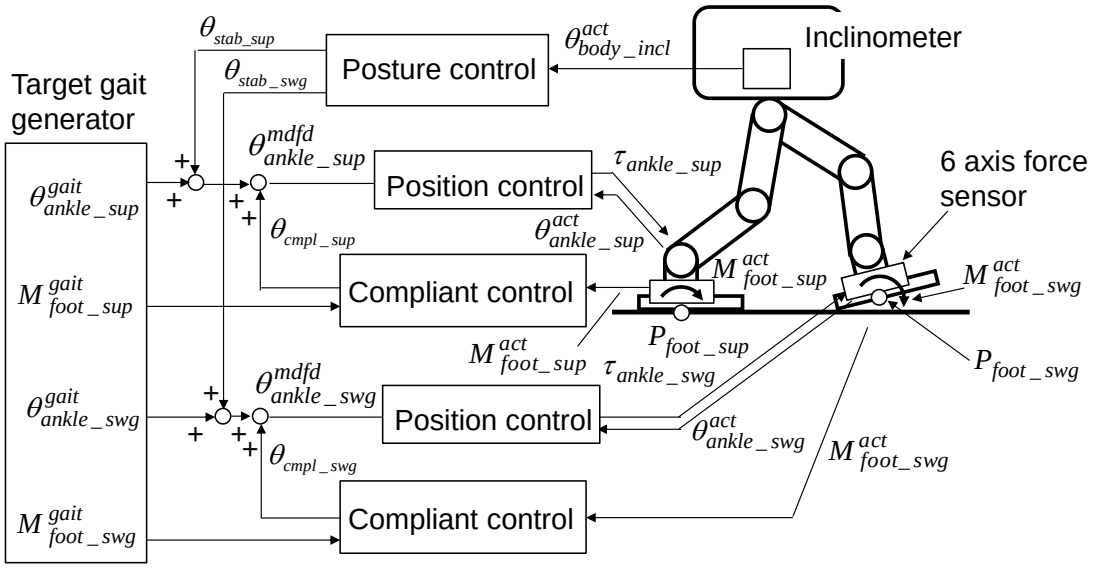


Fig.7.3 System of ankle joint compliant control and posture control

姿勢安定化制御部は，上体傾き偏差（実際の上体傾きと目標歩容の上体傾きの差）が 0 に収束するように，姿勢安定化足首角修正量θ_{stab}を決定する．

足首コンプライアンス制御部と変位制御部は，支持脚用と遊脚用に分かれているが，以下の説明では，以下では，「支持脚用/遊脚用」を省略する．

各脚の足首中心から足底に降ろした垂線と足底の交点を，足底基準点P_{foot}とすると，足首コンプライアンス制御部は，各足部に関して，足底基準点P_{foot}まわりに作用する脚床反力モーメントM_{foot}^{act}を 6 軸力センサによって検出し，目標歩容から算出される足底基準点P_{foot}まわりの目標脚床反力モーメントM_{foot}^{gait}と前記M_{foot}^{act}との差に応じて，コンプライアンス足首角修

正量θ_{cmpl}を決定する．

変位制御部は，目標歩容足首角θ_{ankle}^{gait}にθ_{stab}とθ_{cmpl}を加えることで得られる修正目標足首角θ_{ankle}^{mdfd}に実足首角θ_{ankle}^{act}を追従させ，その他の関節に関しては，目標歩容の関節角に実関節角を追従させる．

制御系の詳細ブロック図を Fig. 7. 4 に示す．以下に Fig. 7. 4 を用いて，制御の詳細を説明する．

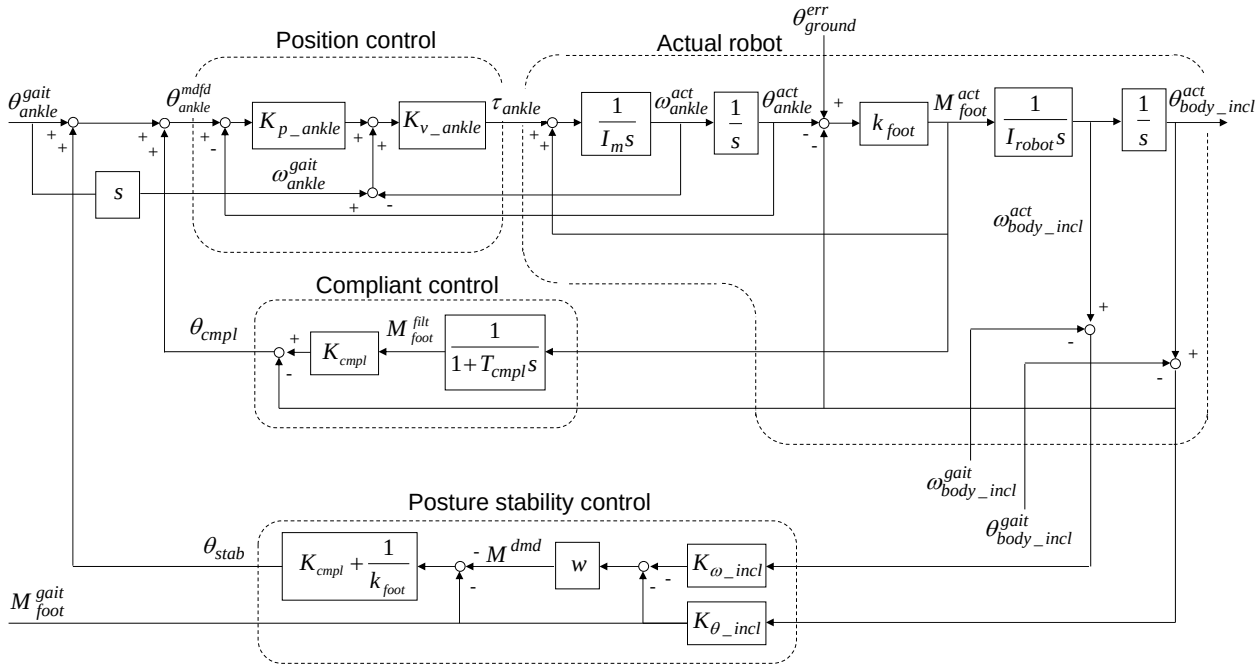


Fig.7.4 Block diagram of ankle joint compliant control and posture control

足首コンプライアンス制御部は，次式のように，足底基準点P_{foot}まわりに作用する実脚床反力M_{foot}^{act}を時定数T_{cmpl}の 1 次ローパスフィルタに通すことによってM_{foot}^{filt}を求める．

$$M_{foot}^{filt} = \frac{1}{1+T_{cmpl}s} M_{foot}^{act} \tag{7.1}$$

ローパスフィルタには，フィードバックされるM_{foot}^{act}の高域成分を低減して，コンプライアンス制御の発振を抑制する効果がある．

次いで，次式により，コンプライアンス足首角修正量θ_{cmpl}を求める．

$$\theta_{cmpl} = K_{cmpl} M_{foot}^{filt} - \left(\theta_{body_incl}^{act} - \theta_{body_incl}^{gait}\right) \tag{7.2}$$

上式右辺第 2 項は，上体傾き角偏差$\left(\theta_{body_incl}^{act} - \theta_{body_incl}^{gait}\right)$による足底と床面との相対角度変化を打ち消すための項である．これにより，姿勢安定化足首角修正量θ_{stab}を除けば，グロ

ーバル座標系上での実足部傾きと，目標歩容の足部傾き（想定していた床傾き）との差は，定常的には実脚床反力モーメントM_{foot}^{act}に比例するようになる．（上式右辺第 2 項によって，Fig. 7. 4 における実ロボットブロック内の$\left(\theta_{body_incl}^{act}-\theta_{body_incl}^{gait}\right)$から$K_{foot}$の手前の加算点まで戻る機械的なフィードバックの影響が打ち消される．）

姿勢安定化制御部は，まず，実上体傾き角・角速度$(\theta_{body_incl}^{act},\omega_{body_incl}^{act})$と目標歩容の上体傾き角・角速度$(\theta_{body_incl}^{gait},\omega_{body_incl}^{gait})$との差に応じて，次式のように，ＰＤ制御則を用いて，復元力モーメント要求値M^{dmd}を決定する．

$$M^{dmd}=w\left\{-K_{\theta_incl}\left(\theta_{body_incl}^{act}-\theta_{body_incl}^{gait}\right)-K_{\omega_incl}\left(\omega_{body_incl}^{act}-\omega_{body_incl}^{gait}\right)\right\} \quad (7.3)$$

なお，姿勢制御ゲイン用重みwは，各脚に用意しておき，基本的には目標歩容における脚床反力鉛直成分と全床反力鉛直成分の比となるようにして，足部が接地していない場合には 0 とする．ただし，実際の着地・離床のタイミングがずれる場合も考慮して，姿勢制御ゲイン用重みwは，着地直前から徐々に高くし，離床時から所定の時間を経過してから 0 になるようにする．

姿勢安定化制御部は，次いで，足底基準点P_{foot}まわりに復元力モーメント要求値M^{dmd}と目標脚床反力モーメントM_{foot}^{gait}の和が発生するように，次式により，姿勢安定化足首角修正量θ_{stab}を求める．

$$\theta_{stab}=-\left(K_{cmpl}+\frac{1}{K_{foot}}\right)\left(M^{dmd}+M_{foot}^{gait}\right) \quad (7.4)$$

なお，右辺の$\left(K_{cmpl}+1/k_{foot}\right)$は，足部柔軟構造と足首コンプライアンス制御とによる総合的なコンプライアンス定数であり，Fig. 7. 4 において，床傾き偏差θ_{ground}^{err}から実脚床反力M_{foot}^{act}までの伝達関数の定常ゲインの逆数である．

変位制御部は，式(7. 5)で求められる修正目標足首角θ_{ankle}^{mdfd}に実足首角度θ_{ankle}^{act}を追従させるように，式(7. 6)に従って，足首アクチュエータ出力トルクτ_{ankle}を決定する．

$$\theta_{ankle}^{mdfd}=\theta_{ankle}^{gait}+\theta_{stab}+\theta_{cmpl} \quad (7.5)$$

$$\tau_{ankle}=K_{p_ankle}\left\{\left(\theta_{ankle}^{mdfd}-\theta_{ankle}^{act}\right)+K_{v_ankle}\left(\omega_{ankle}^{gait}-\omega_{ankle}^{act}\right)\right\} \quad (7.6)$$

なお，図には示していないが，その他の関節（i:関節番号）のアクチュエータ出力トルク

は，次式に従って，目標歩容の関節角に追従するように制御される．

$$\tau_i = K_{p_i}\left\{\left(\theta_i^{gait} - \theta_i^{act}\right) + K_{v_i}\left(\omega_i^{gait} - \omega_i^{act}\right)\right\} \tag{7.7}$$

ここで，コンプライアンス制御の安定性を議論するために，Fig.7.4 において，θ_{ankle}^{gait}と$\left(\theta_{body_incl}^{act} - \theta_{body_incl}^{gait}\right)$を 0 として，$\omega_{ankle}^{act}$，$\theta_{ankle}^{act}$および$\tau_{ankle}$の関係を求めると，次式が得られる．

$$\tau_{ankle} = -\left(\frac{k_{foot}K_{cmpl}}{1+T_{cmpl}s} + 1\right)K_{p_ankle}K_{v_ankle}\theta_{ankle}^{act} - K_{v_ankle}\omega_{ankle}^{act} \tag{7.8}$$

上式は，θ_{ankle}^{act}の係数を変位フィードバックゲイン，ω_{ankle}^{act}の係数を速度フィードバックゲインとみなせば，θ_{ankle}^{act}の変位制御の式となる．すなわち，時定数T_{cmpl}のローパスフィルタを除けば，コンプライアンス制御ゲインK_{cmpl}は，足首角度ゲインK_{p_ankle}を$\left(k_{foot}K_{cmpl}+1\right)$倍することと等価であると言える．そこで，以降，$K_{p_ankle}\left(k_{foot}K_{cmpl}+1\right)$を，等価変位ゲインと呼ぶこととする．補足すると，コンプライアンス制御は，足部柔軟構造のたわみ量を制御するものであるから，足首変位制御と同次元の制御であると言える．

足首角速度ゲインK_{v_ankle}は，古典的な制御調整法ではあるが，速度制御のステップ応答のオーバーシュートが 10～20%になるように設定される．この値は，主にモータとモータドライバの応答速度に依存する．一方，等価変位ゲイン$K_{p_ankle}\left(k_{foot}K_{cmpl}+1\right)$の限界値は，$K_{v_ankle}$に依存する．したがって，$K_{cmpl}$を高くするためには，足首角度ゲイン$K_{p_ankle}$を，コンプライアンス制御がない場合での足首角度ゲインの限界値よりも下げる必要がある．

2 脚ロボット E4 では，最近のモータドライバに比べると能力が低いアナログ方式のモータドライバを用いていたため，各軸の角速度制御の時定数は，1～3[msec]であった．足首の角度ゲインK_{p_ankle}は，1.8*10[rad/(rad/sec)]，その他の関節は，3*10[rad/(rad/sec)]程度に設定した．M_{foot}^{act}のローパスフィルタの時定数T_{cmpl}は，0.1[sec]とした．

Fig.7.4 において，変位制御のゲインが十分に高く，実足首角度θ_{ankle}^{act}が，足首コンプライアンス制御に入力される最終的な修正目標足首角θ_{ankle}^{mdfd}に完全に追従するものとすると，Fig.7.4 は Fig.7.5 に変換される．さらに，Fig.7.5 において，実ロボットブロックとコンプライアンス制御部を一体化すると，Fig.7.6 が得られる．

Fig.7.6 において，点線の枠で囲まれた実ロボットとコンプライアンス制御部の中の左のブロックは，床の傾き偏差θ_{ground}^{err}からM_{foot}^{act}までの伝達関数であり，足部柔軟構造とコンプライアンス制御部を合わせた総合的なコンプライアンス剛性を表す．この部分は，等価的に Fig.7.7 のように表される．すなわち，バネとダンパーの直列にバネを並列したものとなる．また，ダンピング係数は，ローパスフィルタ時定数に比例する．

上記のように，ローパスフィルタには，コンプライアンス制御系の高周波数領域での開ル

ープゲインを下げて発振を抑制すると共に，上体傾き偏差制御に対してダンピングを与える効果がある．しかし，着地衝撃のピーク値が高くなる欠点があるので，モータドライバの応答速度が十分に高い場合には，ローパスフィルタ時定数を小さくするか，あるいはローパスフィルタを無くす方がよい．（上体傾き偏差制御のダンピングに関しては，ローパスフィルタ時定数に頼らず，上体傾き角速度フィードバックで調整するのが望ましい．）

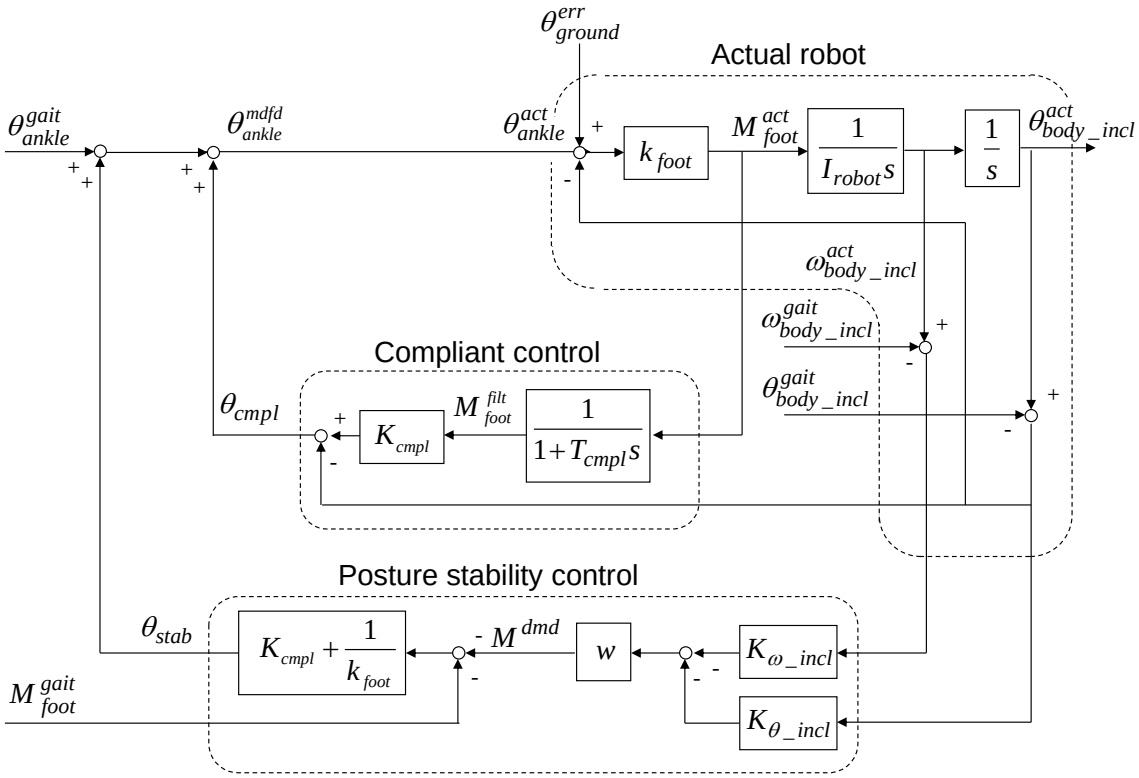


Fig.7.5 Approximate block diagram of ankle joint compliant control and posture control

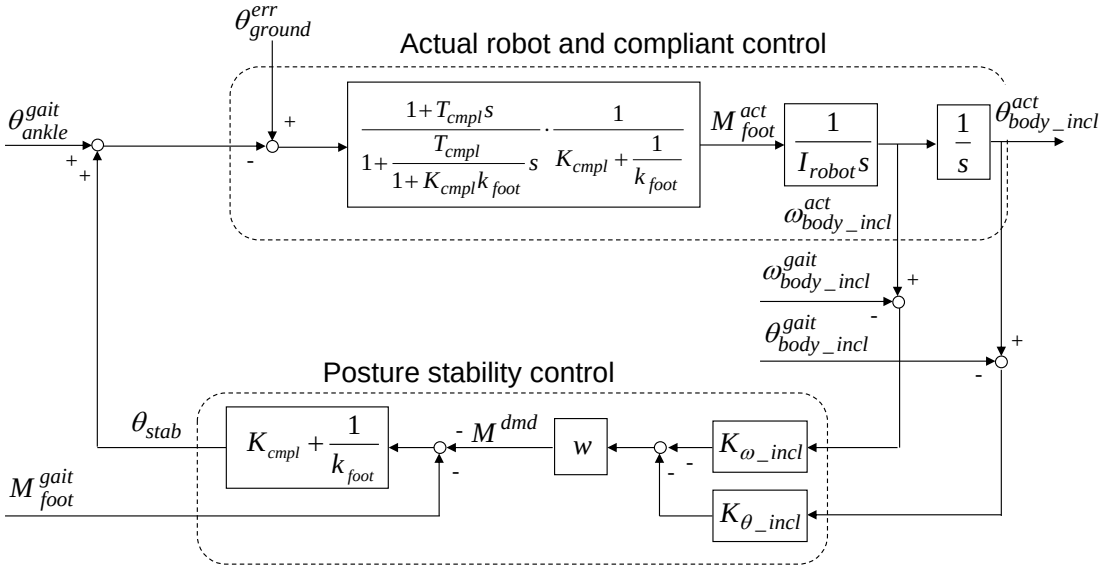


Fig.7.6 Transformed block diagram of ankle joint compliant control and posture control

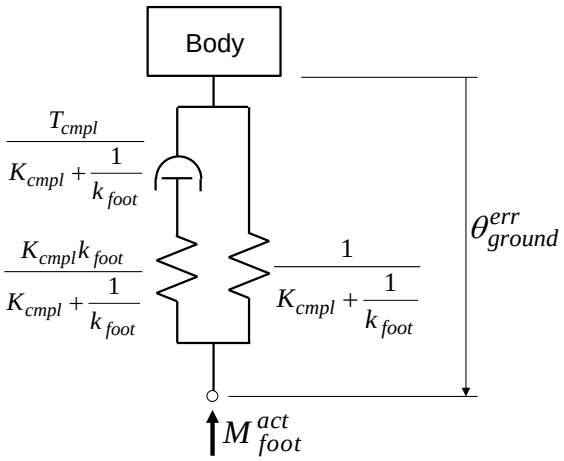


Fig.7.7 Equivalent system of robot with ankle compliant control

7.5 足首コンプライアンス制御の問題点

足首コンプライアンス制御と足首関節角度を操作する姿勢安定化制御には,3 つの問題点があった.

第 1 の問題点は，原理的に，接地部分の局所的な傾きを吸収することはできても，両足首の高低差を操作することができないので，両脚支持期における左脚の接地面と右脚の接地面との間の高低差を吸収できないことであった.

第 2 の問題点は，水平面での歩行であっても，両脚支持期において，かえって姿勢が不安定になることであった．例えば，片脚支持期において前に倒れそうな状況では，つま先を下げれば姿勢を回復させることが可能であるが, Fig. 7. 8 のように，両脚支持期において前に倒れそうな状況では，同じように足首を回転させると，前脚のかかとが上がって前脚の脚床反力が減少し，後脚のつま先が下がって後脚の脚床反力が増加するので，実 COP が後ろに移動する．この結果，ロボット全体はさらに前傾してしまう．両脚支持期に，K_{θ_incl}とD_{ω_incle}を負にして，足首を回転させる極性を逆にしてみたが，足首の動きがスムーズでなくなり，さらに不安定になった.

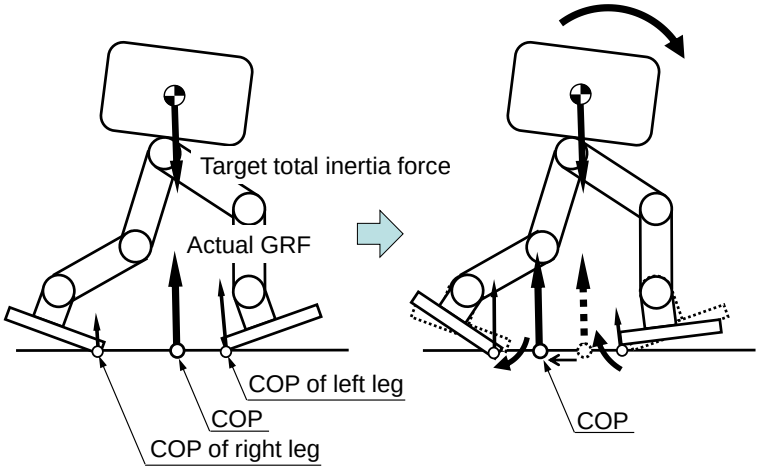


Fig.7.8 Problem of ankle joint compliant control and posture control during double support phase

第 3 の問題点は，片脚支持期において姿勢制御によって足首を曲げると，Fig. 7. 9 に示すように，足部柔軟構造部分が足底近くを変形中心にしてたわむために，足首位置が水平方向に変動し，これに伴って，全体重心がほとんど移動しない 2 次振動的な上体傾き角が発生し，発振し易くなることであった．

補足すると，着地衝撃吸収能力を向上させたり，床の凹凸の影響をすばやく吸収したりする上では，足部柔軟構造部分を柔らかく設定すべきであるが，柔らかくする程，同じ床反力モーメントを発生させるために，上体傾き角偏差から足首曲げ角修正量までのフィードバックゲインを高くしなければならないので，上記 2 次振動的な上体傾き角が大きくなり，発振し易くなる．

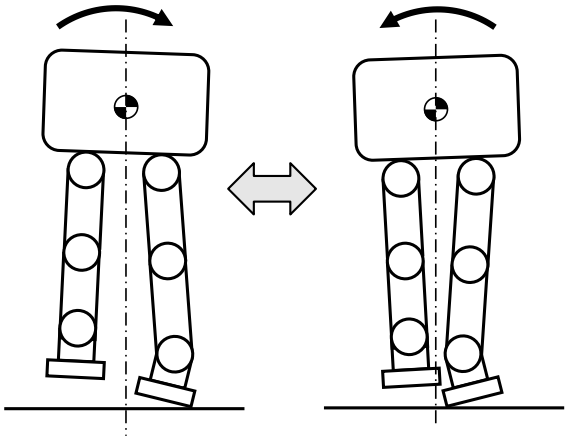


Fig.7.9 Problem of ankle joint compliant control and posture control during single support phase

7.6 まとめ

本章では，1990 年頃の初期の歩行制御システムの構成と機能の概要を述べた．次いで，床反力制御の変遷を述べた後，初期の床反力制御である，足首を曲げることによって床の凹凸の吸収と姿勢安定化を図る「足首コンプライアンス制御」について，制御特性を議論した．最後に，足首コンプライアンス制御には，以下の 3 つの問題点があることを示した．

1. 支持脚の接地面と遊脚の接地面の高低差を吸収できないこと．
2. 両脚支持期にかえって姿勢を転倒させる床反力モーメントを発生してしまうこと．
3. コンプライアンス動作によって足首位置が水平方向に変動し，上体傾きの発振が生じ易いこと．

次章では，これらの問題点を解決する「複合コンプライアンス制御」を提案する．

第８章．複合コンプライアンス制御

第８章．複合コンプライアンス制御

8.1 はじめに

複合コンプライアンス制御は，前述の足首コンプライアンス制御の問題点を解消するために開発した床反力制御であり，片脚支持期，両脚支持期いずれにおいても，床の想定外の凹凸が各脚床反力に及ぼす影響を低減すると共に，姿勢を安定化するために必要な床反力モーメント（床反力モーメント要求値）を目標 ZMP まわりに発生させるように，目標歩容の両足部の位置・姿勢を修正する制御である．

後述するように，複合コンプライアンス制御によって，片脚支持期，両脚支持期いずれにおいても，上体位置・姿勢偏差の挙動は，目標 ZMP を支点とする倒立振子の挙動とほぼ等しくなるので，姿勢安定化制御設計（姿勢を安定化するために必要な床反力モーメントの決定方法）が極めて容易になる．

以下，8.2 節では，複合コンプライアンス制御システムの機能ブロック図を示す．8.3 節では，姿勢を安定化するための復元力モーメント要求値を，「両脚コンプライアンス制御」への目標値と「足部コンプライアンス制御」への目標値とに分配する分配器について説明する．8.4 節では，両脚コンプライアンス角の決定法，8.5 節では，足部コンプライアンス角の決定法，8.6 節では，これらのコンプライアンス角による補償目標歩容の決定法を説明する．8.7 節では，床形状偏差の推定法について述べる．8.8 節では，段差通過を例にとって，複合コンプライアンス制御の動作を具体的に説明する．8.9 節では，複合コンプライアンス制御によって上体位置・姿勢偏差挙動が倒立振子化されることを示す．8.10 節では，倒立振子化された上体の傾き偏差の運動方程式を導出する．8.11 節では，走行時の着地衝撃を吸収するための並進コンプライアンス制御を説明する．8.12 節では，足部柔軟構造の効果について述べ，最後に 8.13 節において，本章をまとめる．

8.2 複合コンプライアンス制御システム

以下に，本章で使用する表記を列挙する．

$x_{total}^{gaitZMP}$ ： 目標 ZMP

F_{total}^{gait} ： 目標床反力並進力成分

M_{total}^{gait} ： 目標床反力モーメント（目標 ZMP まわりの床反力モーメントの目標値）

$x_{sup/swg}^{gaitCOP}$ ： 目標支持脚/遊脚 COP

$F_{sup/swg}^{gait}$ ： 目標支持脚床反力並進力成分

$M_{sup/swg}^{gait}$ ： 目標支持脚/遊脚床反力モーメント
（目標支持脚/遊脚 COP まわりの支持脚/遊脚床反力モーメントの目標値）

M^{dmd} ： 復元力モーメント要求値（復元力モーメント要求値決定部（7.2 節参照）で決定）

M_{GRF}^{dmd} ： 床反力モーメント要求値

M_{dbv}^{dmd} ： 両脚コンプライアンスモーメント要求値

$M_{supx/y}^{dmd}$ ： 支持脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分

$M_{swgx/y}^{dmd}$： 遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分

V： 目標支持脚 COP と目標遊脚 COP とを結ぶ線分に対して垂直でかつ水平な単位ベクトル

W_{db}： 両脚コンプライアンスモーメント要求値を決定するための重み

$W_{sup/swg}$： 支持脚/遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値を決定するための重み

M_{total}^{act}： 実床反力モーメント（目標 ZMP まわりの床反力モーメントの実際値）

$M_{FsupzFswgz}^{act}$： 実支持脚床反力鉛直成分と実遊脚床反力鉛直成分が目標 ZMP まわりに作用するモーメント

$F_{sup/swg}^{act}$： 実支持脚床反力並進力成分

$M_{sup/swg}^{act}$： 実支持脚/遊脚床反力モーメント
（目標支持脚/遊脚 COP まわりの支持脚/遊脚床反力モーメントの実際値）

T_{db}^{cmpl}： 両脚コンプライアンス用ローパスフィルタ時定数

K_{db}^{cmpl}： 両脚コンプライアンス用ゲイン

$\acute{\theta}_{dbv}^{cmpl}$： 両脚コンプライアンス基本角

$\theta_{dbv}^{gait_deform}$： 目標歩容床反力による両脚間たわみ角

$\theta_{dbv}^{deform_by_Mdmd}$：両脚コンプライアンスモーメント要求値による両脚間たわみ角

θ_{dbv}^{cmpl}： 両脚コンプライアンス角

$\theta_{incl_bodyv}^{err}$： 上体傾き偏差のベクトル$V$まわり成分

$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$： 推定両脚間床傾斜角偏差（両脚間床傾斜角偏差の推定値）

$\theta_{ground_dbv}^{err}$： 両脚間床傾斜角偏差

T_{foot}^{cmpl}： 足部コンプライアンス用ローパスフィルタ時定数

K_{foot}^{cmpl}： 足部コンプライアンス基本角ゲイン

$\acute{\theta}_{supx/y}^{cmpl}$： 支持脚足部コンプライアンス基本角$X/Y$成分

$\theta_{supx/y}^{gait_deform}$： 目標歩容支持脚床反力による支持脚たわみ角$X/Y$成分

$x_{supx/y}^{mech_cmpl_center}$：支持脚足部弾性変形中心点の支持脚座標系$X/Y$成分

$k_{footx/y}^{rot_mech_cmpl}$：足部の$X/Y$軸まわりのメカニカル・回転コンプライアンス定

$k_{foot}^{trans_mech_cmpl}$：足部のメカニカル・鉛直並進コンプライアンス定数

$\theta_{supx/y}^{deform_by_Mdmd}$：床反力モーメント要求値による支持脚たわみ角$X/Y$成分

$\Delta F_{sup/swgz}^{dmd_by_Mdmddbv}$：両脚コンプライアンスモーメント要求値による両脚間たわみ角$\theta_{dbv}^{deform_by_Mdmd}$に起因する支持脚/遊脚鉛直床反力変化分

$\theta_{supx/y}^{cmpl}$： 支持脚足部コンプライアンス角X/Y成分

$\theta_{swgx/y}^{cmpl}$： 遊脚足部コンプライアンス角X/Y成分

$\theta_{incl_bodysupx/y}^{err}$：上体傾き偏差$X/Y$成分（上体傾き偏差支持脚座標系$X/Y$成分）

$\theta_{incl_body}^{err}$： 上体傾き偏差

$\theta_{ground_supx}^{err}$： 支持脚床傾斜角偏差$X$成分

$\theta_{ground_supy}^{err}$： 支持脚床傾斜角偏差$Y$成分

$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$： 推定支持脚床傾斜角偏差$X$成分（支持脚床傾斜角偏差$X$成分$\theta_{ground_supx}^{err}$の

推定値）

$\theta_{ground_supy}^{err_estm}$： 推定支持脚床傾斜角偏差$Y$成分（支持脚床傾斜角偏差$Y$成分$\theta_{ground_supy}^{err}$の推定値）

$x_{sup/swg}^{gait}$： 目標歩容の支持脚/遊脚足部位置

$\theta_{sup/swg}^{gait}$： 目標歩容の支持脚/遊脚足部姿勢

$x_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$： 補償目標支持脚/遊脚足部位置

$\theta_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$： 補償目標支持脚/遊脚足部姿勢

$x'^{gaitCOP}_{sup/swg}$： 修正された目標支持脚/遊脚 COP

$x_{sup/swg}^{act_deform}$： 実支持脚/遊脚足部並進たわみ

$\theta_{sup/swg}^{act_deform}$： 実支持脚/遊脚足部たわみ角

$x_{sup/swg}^{act}$： 実支持脚/遊脚足部位置

$\theta_{sup/swg}^{act}$： 実支持脚/遊脚足部姿勢

$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$： 瞬時両脚間床傾斜角偏差

$\theta_{ground_sup/swg}^{err_inst_estm}$：瞬時支持脚/遊脚床傾斜角偏差

$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$： 推定両脚間床傾斜角偏差

F_{min}, r_{min}： 両脚間床傾斜角偏差推定用許容値

T_{db}^{estm}： 両脚間床傾斜角偏差推定用ローパスフィルタ時定数

$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$： 推定支持脚床傾斜角偏差$X$成分

$\theta_{ground_supy}^{err_estm}$： 推定支持脚床傾斜角偏差$Y$成分

$\theta_{ground_swgx}^{err_estm}$： 推定遊脚床傾斜角偏差$X$成分

$\theta_{ground_swgy}^{err_estm}$： 推定遊脚床傾斜角偏差$Y$成分

F_{foot_min}： 各脚床傾斜角偏差推定用鉛直床反力許容値

$[x_{supy_min}^{COP}, x_{supy_max}^{COP}]$：支持脚床傾斜角偏差$X$成分推定用 COP 許容範囲

x_{sup}^{actCOP}： 実支持脚/遊脚 COP

T_{foot}^{estm}： 各脚床傾斜角偏差推定用ローパスフィルタ時定数

複合コンプライアンス制御を働かせるためには，あらかじめ歩容生成部において，目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$と目標床反力（並進力F_{total}^{gait}，モーメントM_{total}^{gait}）とを基に，目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$，目標遊脚 COP $x_{swg}^{gaitCOP}$，目標支持脚床反力（並進力F_{sup}^{gait}，モーメントM_{sup}^{gait}）および目標遊脚床反力（並進力F_{swg}^{gait}，モーメントM_{swg}^{gait}）を決定しておく必要がある．これらは，例えば Fig.8.1 に示す目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$と目標床反力（並進力F_{total}^{gait}，モーメントM_{total}^{gait}）に対しては，Fig.8.2 のように決定される．

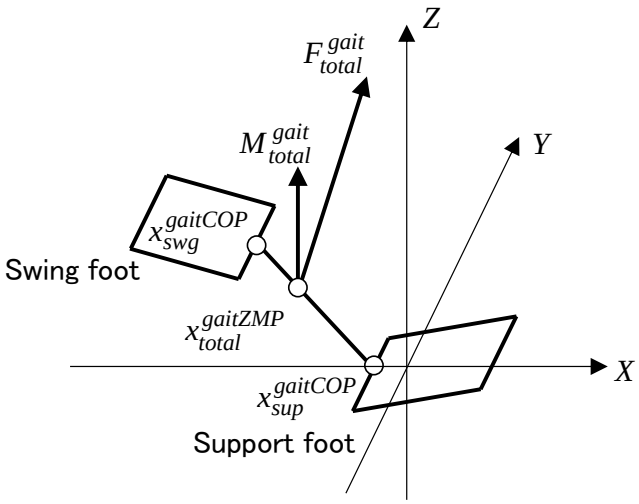


Fig.8.1 Target GRF

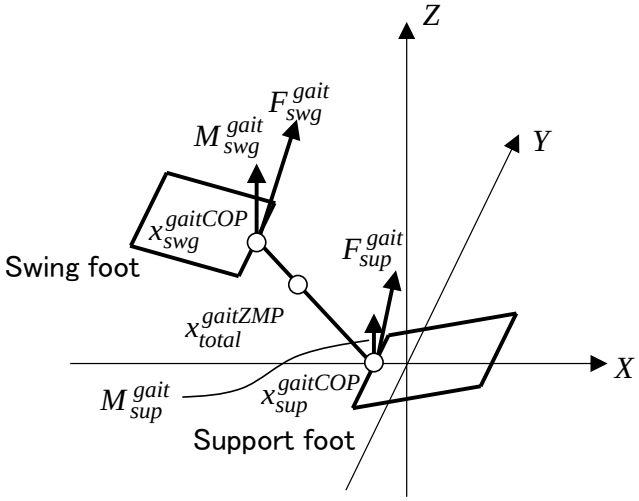


Fig.8.2 Target support/swing foot GRF

目標 ZMP の定義より，目標床反力モーメントM^{gait}_{total}は，鉛直ベクトル（水平成分が 0 のベクトル）である．これと同様に，目標支持脚床反力モーメントM^{gait}_{sup}および目標遊脚床反力モーメントM^{gait}_{swg}も，鉛直ベクトルとする．したがって，目標支持脚 COP $x^{gaitCOP}_{sup}$と目標遊脚 COP $x^{gaitCOP}_{swg}$と目標 ZMP $x^{gaitZMP}_{total}$は，同一直線上に設定される．ただし，目標支持脚/遊脚 COP $x^{gaitCOP}_{sup/swg}$は，支持脚/遊脚支持多角形（支持脚/遊脚のすべての接地領域を含む最小凸領域）に含まれるように設定される．

逆に，目標支持脚/遊脚 COP $x^{gaitCOP}_{sup/swg}$を支持脚/遊脚支持多角形に設定してから，これらを結ぶ線分上に目標 ZMP $x^{gaitZMP}_{total}$を設定してもよい．

7.2 節で述べたように，ロボット全体の姿勢を安定化させるために，復元力モーメント要求値決定部（Determinator of restoring moment demand）によって，上体傾き偏差を基に復元

力モーメント要求値M^{dmd}が決定される．復元力モーメント要求値M^{dmd}は，床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}として，複合コンプライアンス制御システム（Fig.7.1 の床反力制御部（GRF controller)）に入力される．床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}は，ロボット全体の姿勢を安定化させるために，目標 ZMP まわりに発生させるべき床反力モーメントである．Fig.8.3 に，床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}の一例を示す．

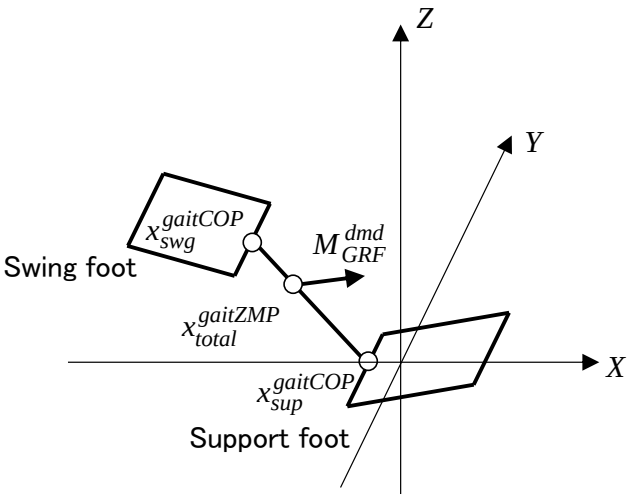


Fig.8.3 Restoring moment demand

なお，第９章の大局的姿勢安定化制御では，復元力モーメント要求値M^{dmd}は，床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}とモデル ZMP 制御用モーメント要求値M_{mdl}^{dmd}に分配されるので，復元力モーメント要求値M^{dmd}と床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}が一致するとは限らない．

Fig.8.4 に，複合コンプライアンス制御システムの機能ブロック図を示す．以下では，この図のデータの流れに沿って，複合コンプライアンス制御を説明する．

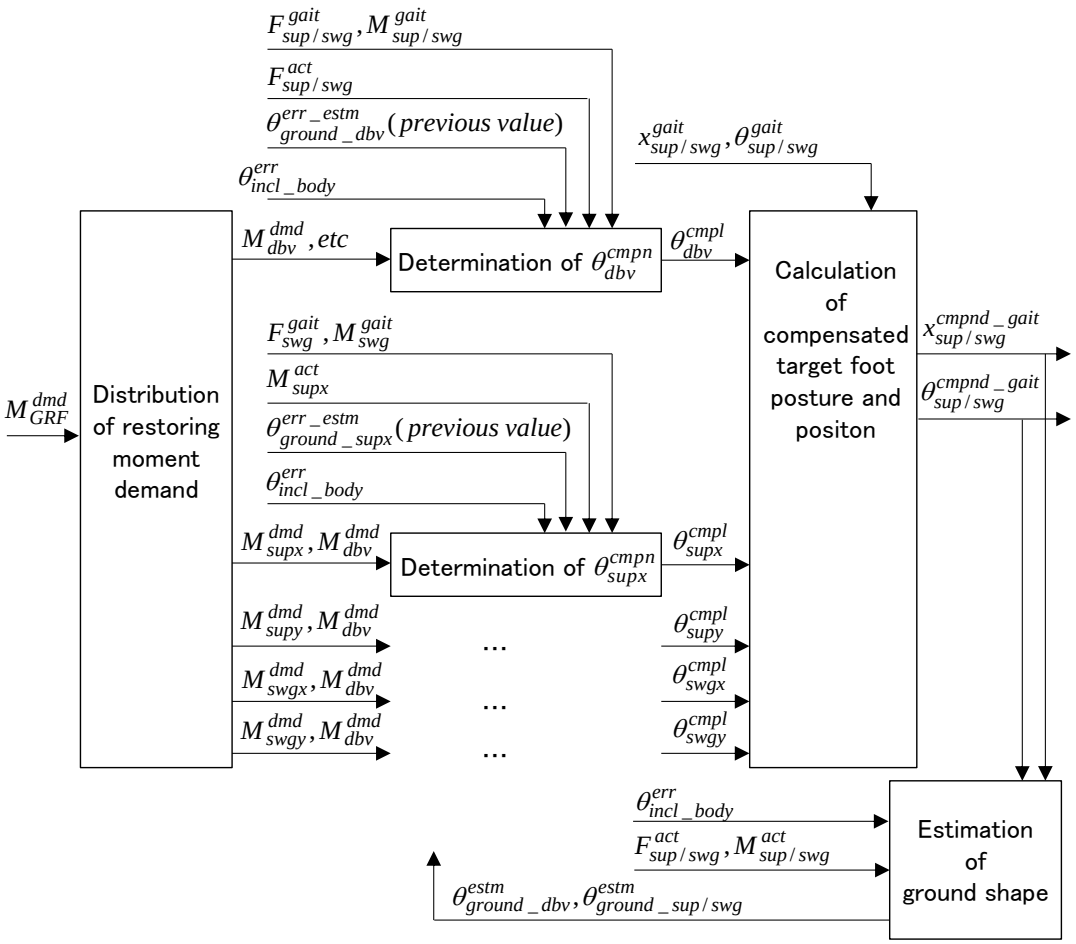


Fig.8.4 System block diagram of combined compliant control

8.3 復元力モーメント要求値分配器

複合コンプライアンス制御システムでは，まず，床反力モーメント要求値分配器(Distribution of GRF moment demand)において，床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}を基に，両脚コンプライアンスモーメント要求値M^{dmd}_{dbv}，支持脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分$M^{dmd}_{supx/y}$，遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分$M^{dmd}_{swgx/y}$が決定される．

両脚コンプライアンスモーメント要求値M^{dmd}_{dbv}は，支持脚足部の鉛直位置と遊脚足部の鉛直位置との差（支持脚足部と遊脚足部の高低差）を制御することで発生させるべき床反力モーメントである．

支持脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分$M^{dmd}_{supx/y}$は，支持脚足部を目標支持脚 COP まわりに回転させることで発生させるべき支持脚床反力モーメントである．遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分$M^{dmd}_{swgx/y}$は，遊脚足部を目標遊脚 COP まわりに回転させることで発生させるべき遊脚床反力モーメントである．

以下では，床反力モーメント要求値分配器の機能を，Fig.8.5 に示すブロック図に沿って説明する．

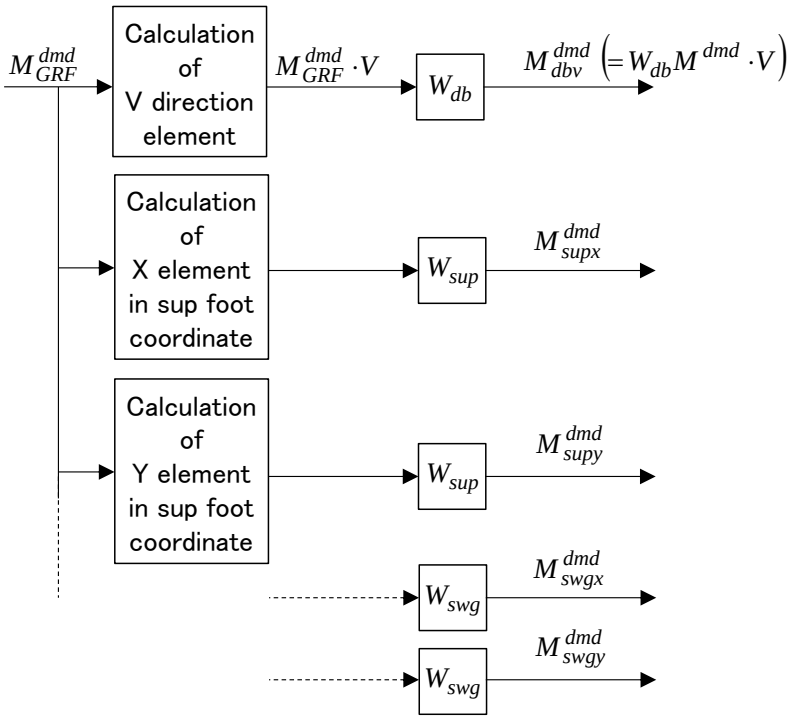


Fig.8.5 Distribution of GRF moment demand

Fig. 8. 6 に示すように，目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$ と目標遊脚 COP $x_{swg}^{gaitCOP}$ とを結ぶ線分に対して垂直でかつ水平な単位ベクトルをVとする．（ただし，ベクトルVと， $x_{sup}^{gaitCOP}$ を始点とし$x_{swg}^{gaitCOP}$を終点とするベクトルとの外積がZ軸の正方向を向くように，単位ベクトルVの向きを決定する．）

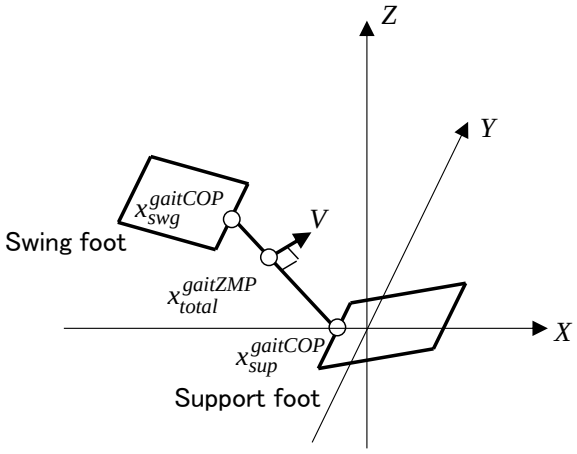


Fig.8.6 Vector V

両脚コンプライアンスモーメント要求値M_{dbv}^{dmd}は，次式によって決定される．ただし，“・”は内積を表す．

$$M_{dbv}^{dmd} = W_{db}V \cdot M_{GRF}^{dmd} \tag{8.1}$$

すなわち，M_{dbv}^{dmd}は，床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}のベクトルV方向成分（ベクトルVまわり成分）に重みW_{db}を乗じたものとする．

重みW_{db}は，例えば，Fig.8.7 のように，両脚支持期では 1 とし，片脚支持期への切り替わり目から徐々に 0 にする．また，次の両脚支持期になるまでに徐々に 1 に戻すべきであるが，路面の凹凸等によって次の着地が早まる可能性を考慮すると，早めに 1 に戻しておくことが望ましい．

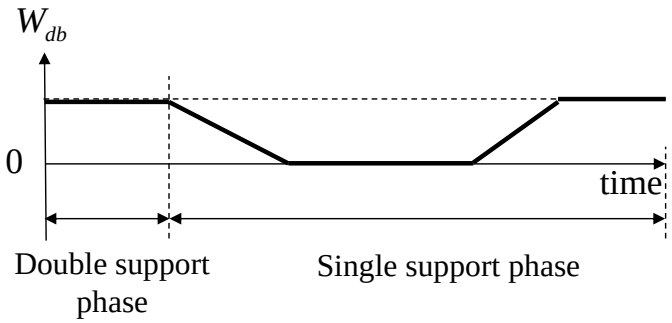


Fig.8.7 Time chart of weight for double compliant control

Fig.8.8 に，M_{dbv}^{dmd}を示す．（Fig.8.8 では，M_{dbv}^{dmd}と $V \cdot M_{dbv}^{dmd}$が区別できるように，W_{db}を 1 未満としたが，両脚支持期であるので，実際には 1 に設定される．）

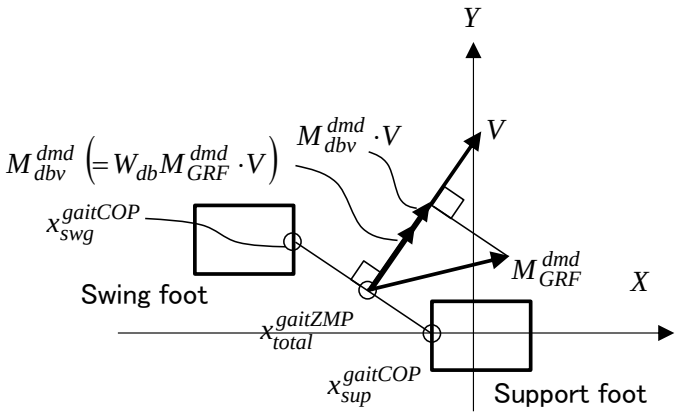


Fig.8.8 Moment demand for double foot compliant control

支持脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分$M_{supx/y}^{dmd}$は，Fig.8.5 に示すように決定される．すなわち，床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}の支持脚座標系でのX成分とY成分を抽出し，それぞれに重みW_{sup}を乗じることによって，M_{supx}^{dmd}，M_{supy}^{dmd}が求められる．

遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値X/Y成分$M_{swgx/y}^{dmd}$も，同様に，床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}の遊脚座標系でのX/Y成分を抽出し，それぞれに重みW_{swg}を乗じることによって求められる．

ここで，遊脚座標系とは，一歩前（今の遊脚が支持脚であった時期）での支持脚座標系のことである．

重みW_{sup}，W_{swg}は，例えば，以下のように決定される．

W_{sup}とW_{swg}の和は，1 とする．W_{sup}とW_{swg}の比は，目標遊脚 COP $x_{swg}^{gaitCOP}$と目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$との距離と，目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$と目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$との距離の比とする．

なお，目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$は，両脚支持期に，目標遊脚 COP $x_{swg}^{gaitCOP}$から目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$まで，等速直線運動で移動するものとする．

8.4 両脚コンプライアンス角決定

M_{dbv}^{dmd}，$M_{supx/y}^{dmd}$および$M_{swgx/y}^{dmd}$は，Fig.8.4 に示すように，両脚コンプライアンス角決定部（Determination of θ_{dbv}^{cmpl}）に入力される．

Fig.8.9 に，両脚コンプライアンス角決定部の機能ブロック図を示す．

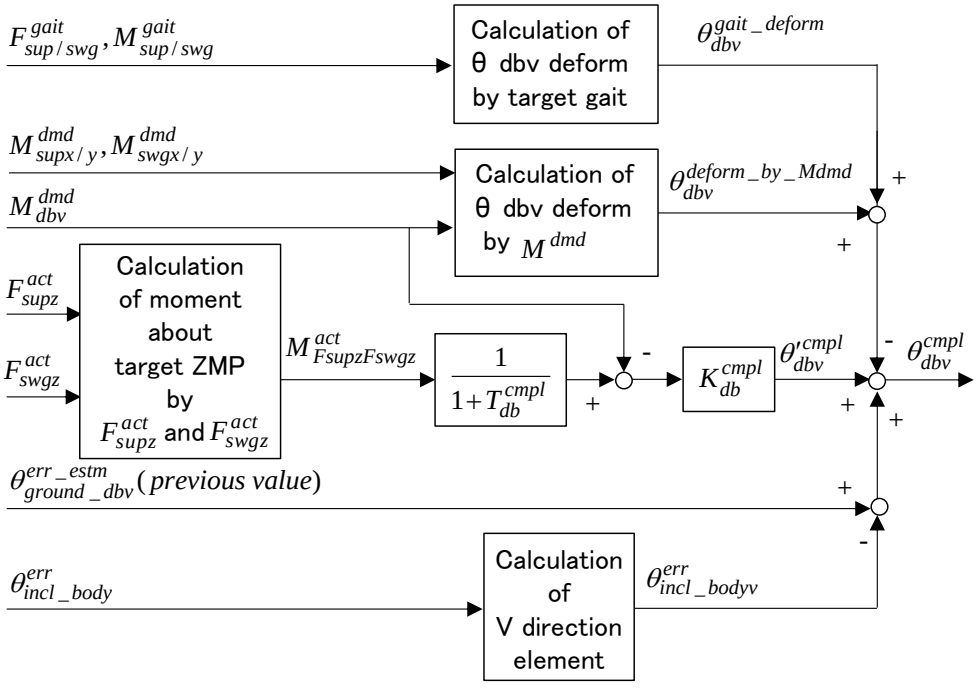


Fig.8.9 Determination of double foot compliant angle

両脚コンプライアンス角決定部では，まず，次式のように，実支持脚床反力鉛直成分と実遊脚床反力鉛直成分が目標 ZMP まわりに作用するモーメント$M_{FsupzFswgz}^{act}$を算出する．

$$M^{act}_{FsupzFswgz} = -\sqrt{\left(x^{gaitZMP}_{totalx} - x^{gaitCOP}_{supx}\right)^2 + \left(x^{gaitZMP}_{totaly} - x^{gaitCOP}_{supy}\right)^2}\, F^{act}_{supz} + \sqrt{\left(x^{gaitZMP}_{totalx} - x^{gaitCOP}_{swgx}\right)^2 + \left(x^{gaitZMP}_{totaly} - x^{gaitCOP}_{swgy}\right)^2}\, F^{act}_{swgz} \quad (8.2)$$

上式の実支持脚/遊脚床反力$F^{act}_{sup/swg}$は，支持脚/遊脚の足部に備えられた 6 軸力センサの検出値を，目標支持脚/遊脚足部姿勢を表す姿勢マトリックスによって支持脚座標系に変換することで求められる． Fig.8.10 に，これらの例を示す．

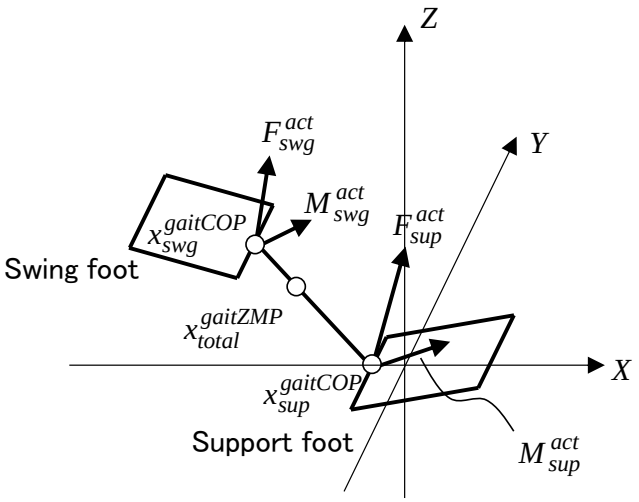


Fig.8.10 Actual foot GRF

次いで,Fig.8.9 に示すように,$M^{act}_{FsupzFswgz}$を時定数T^{cmpl}_{db}の 1 次ローパスフィルタに通し，M^{dmd}_{dbv}を減じ，ゲインK^{cmpl}_{db}を乗じることにより，両脚コンプライアンス基本角$\dot{\theta}^{cmpl}_{dbv}$を得る．

なお，1 次ローパスフィルタには，コンプライアンス制御の高周波数領域での開ループゲインを下げることで発振を抑制すると共に，コンプライアンス制御の閉ループ特性にダンピングを付与する効果がある．（7.4 節での足首コンプライアンスのローパスフィルタの効果の説明を参照のこと）

次いで，目標支持脚床反力F^{gait}_{sup}，M^{gait}_{sup}によって生じる支持脚足部柔軟構造のたわみと目標遊脚床反力F^{gait}_{swg}，M^{gait}_{swg}によって生じる遊脚足部柔軟構造のたわみとを，足部柔軟構造の弾性変形モデルを用いて求め，さらに，これらのたわみに起因する，目標支持脚 COP に対応する支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する遊脚足部の点とを結ぶ線分の傾斜角の変化量を求める．以降，これを，目標歩容床反力による両脚間たわみ角$\theta^{gait_deform}_{dbv}$と呼ぶ．（経験上，線形モデルを用いた場合と，より精度の高い非線形モデルを用いた場合とで，効果の差はほとんどなかったので，ここでは，弾性変形モデルは線形モデルとする．）

同様に，M^{dmd}_{dbv}，$M^{dmd}_{supx/y}$および$M^{dmd}_{swgx/y}$が目標 ZMP $x^{gaitZMP}_{total}$まわりに作用することによって生じる支持脚/遊脚足部柔軟構造のたわみを，足部柔軟構造の弾性変形モデルを用いて求め，これらのたわみに起因する，目標支持脚 COP に対応する支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対

応する遊脚足部の点とを結ぶ線分の傾斜角の変化量を求める．以降，これを，両脚コンプライアンスモーメント要求値による両脚間たわみ角$\theta_{dbv}^{deform_by_Mdmd}$と呼ぶ．

最後に，次式によって，両脚コンプライアンス角θ_{dbv}^{cmpl}が決定される．

$$\theta_{dbv}^{cmpl} = \theta_{dbv}^{cmpl} - \theta_{dbv}^{gait_deform} - \theta_{dbv}^{deform_by_Mdmd} - \theta_{incl_bodyv}^{err} + \theta_{ground_dbv}^{err_estm} \qquad (8.3)$$

ここで，右辺第 2 項と第 3 項は，フィードバックに頼らずに，F_{sup}^{gait}，F_{swg}^{gait}およびM_{dbv}^{dmd}を瞬時に発生させるためのフィードフォワード補償量に相当する．

また，右辺の$\theta_{incl_bodyv}^{err}$は，上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$（実上体傾きと目標上体傾きの差）のベクトル$V$まわり成分である．$\theta_{dbv}^{cmpl}$の決定において，$\theta_{incl_bodyv}^{err}$を減じることにより，$\theta_{incl_bodyv}^{err}$によって発生する両足部の高低差を打ち消すことができる．

また，右辺の$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$は，推定両脚間床傾斜角偏差であり，両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$の推定値である．両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$は，Fig. 8. 11 のように，実際の両脚間床傾斜角（目標支持脚 COP に対応する実支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する実遊脚足部の点を結んだ線分の傾斜角）と目標歩容を生成する際に想定した両脚間床傾斜角との差である．Fig. 8. 11 の状況では，$\theta_{ground_dbv}^{err}$は正である．（以降，「目標歩容を生成する際に想定した」を「想定した」と省略する場合がある．想定両脚間床傾斜は，両脚支持期では，目標支持脚 COP と目標遊脚 COP を結んだ線分の傾斜角である．）

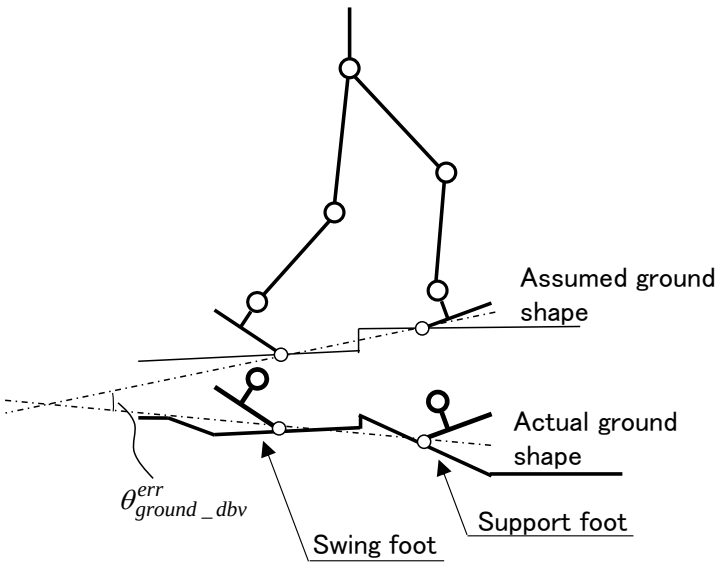


Fig.8.11 Ground inclination between both feet

推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$は，後述する床形状偏差推定器によって推定される．$\theta_{dbv}^{cmpl}$の決定において，$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を加えることにより，$\theta_{ground_dbv}^{err}$の影響を打ち消すことができる．

8.5 足部コンプライアンス角決定

支持脚足部コンプライアンスモーメント要求値X成分M_{supx}^{dmd}および両脚コンプライアンスモーメント要求値M_{dbv}^{dmd}は，Fig.8.4 に示すように，支持脚足部コンプライアンス角X成分決定部（Determination of θ_{supx}^{cmpl}）に入力される．

Fig.8.12 に，支持脚足部コンプライアンス角X成分決定部の機能ブロック図を示す．ここでは，各変数は支持脚座標系で表されるものとする．

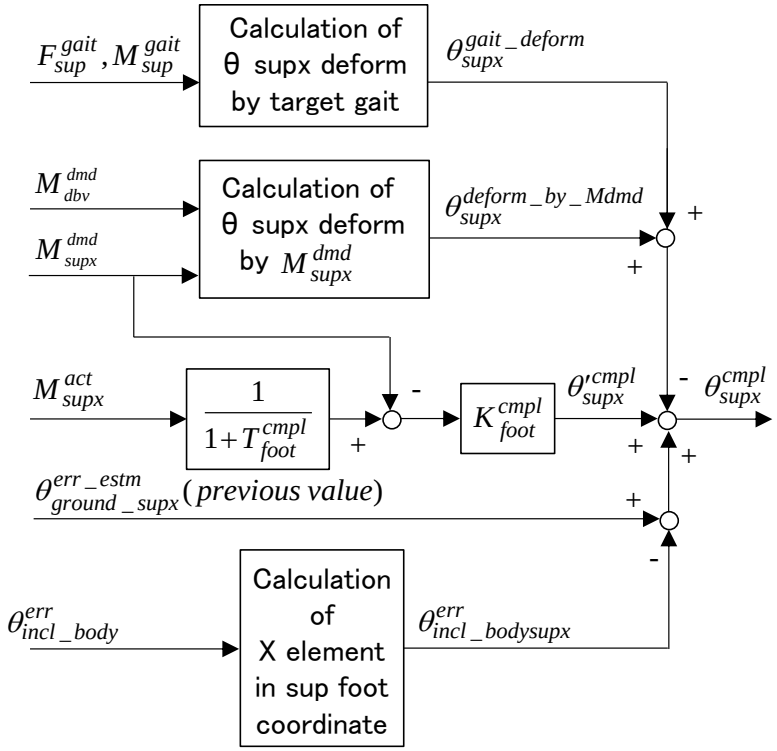


Fig.8.12 Determination of support foot compliant angle

支持脚足部コンプライアンス角X成分決定部では，まず，次式に示すように，目標支持脚COPまわりに作用する実支持脚床反力モーメントX成分M_{supx}^{act}を時定数T_{foot}^{cmpl}の1次ローパスフィルタに通し，M_{supx}^{dmd}を減じ，ゲインK_{foot}^{cmpl}を乗じることにより，支持脚足部コンプライアンス基本角X成分$\acute{\theta}_{supx}^{cmpl}$を得る．

$$\theta'^{cmpl}_{supx} = K_{foot}^{cmpl}\left(\frac{1}{1+T_{foot}^{cmpl}}M_{supx}^{act} - M_{supx}^{dmd}\right) \tag{8.4}$$

両脚コンプライアンス基本角$\acute{\theta}_{dbv}^{cmpl}$を求める場合と同様，1次ローパスフィルタには，コンプライアンス制御の高周波数領域での開ループゲインを下げることで発振を抑制すると共に，コンプライアンス制御の閉ループ特性にダンピングを付与する効果がある．

次いで，目標支持脚床反力F_{sup}^{gait}によって生じる支持脚足部柔軟構造のたわみ角X成分（以降，目標歩容支持脚床反力による支持脚たわみ角X成分$\theta_{supx}^{gait_deform}$と呼ぶ）を，足部柔軟構造の弾性変形モデルを用いて求める．Fig. 8. 13 に，支持脚足部柔軟構造の弾性変形モデルにF_{sup}^{gait}が作用している様子を示す．

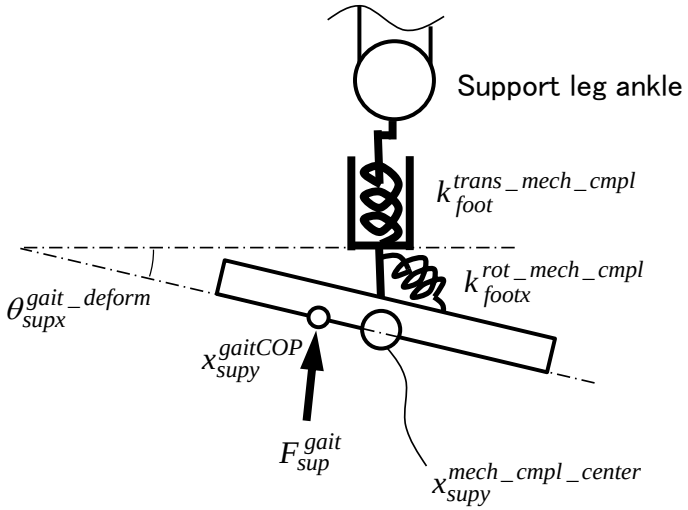


Fig.8.13 Support foot mechanical compliance model

$x_{supy}^{mech_cmpl_center}$は，支持脚足部弾性変形中心点（その点に鉛直方向の並進床反力を与えてもたわみ角が発生しない点）の支持脚座標系Y成分である．

$k_{footx}^{rot_mech_cmpl}$は，支持脚足部の$X$軸まわりのメカニカル・回転コンプライアンス定数（単位モーメントあたりのたわみ角）である．

$k_{foot}^{trans_mech_cmpl}$は，支持脚足部のメカニカル・鉛直並進コンプライアンス定数（単位鉛直並進力あたりの鉛直方向縮み量）である．$k_{foot}^{trans_mech_cmpl}$は，両脚間たわみ角を求める際に用いられる．

目標歩容支持脚床反力による支持脚たわみ角X成分$\theta_{supx}^{gait_deform}$は，支持脚足部弾性変形中心点$Y$成分$x_{supy}^{mech_cmpl_center}$まわりに作用するモーメントに$k_{footx}^{mech_cmpl}$を乗じた値となり，次式で求められる．

$$\theta_{supx}^{gait_deform} = k_{footx}^{rot_mech_cmpl}\left(x_{supy}^{gaitCOP} - x_{supy}^{mech_cmpl_center}\right)F_{supz}^{gait} \tag{8.5}$$

同様に，M_{supx}^{dmd}およびM_{dbv}^{dmd}が目標支持脚 COP まわりに作用したときの支持脚足部柔軟構造のたわみ角X成分が求められる．以降，これを，床反力モーメント要求値による支持脚たわみ角X成分$\theta_{supx}^{deform_by_Mdmd}$と呼ぶ．具体的には，次式によって求められる．

$$\theta_{supx}^{deform_by_Mdmd} = k_{footx}^{rot_mech_cmpl}\left(M_{supx}^{dmd} + \left(x_{supy}^{gaitCOP} - x_{supy}^{mech_cmpl_center}\right)\Delta F_{supz}^{dmd_by_Mdmddbv}\right)$$

(8.6)

ただし，$\theta_{dbv}^{deform_by_Mdmd}$に起因する支持脚/遊脚鉛直床反力変化分を，$\Delta F_{sup/swgz}^{dmd_by_Mdmddbv}$とする．

最後に，次式によって，支持脚足部コンプライアンス角X成分θ_{supx}^{cmpl}を決定する．

$$\theta_{supx}^{cmpl} = \theta_{supx}^{rcmpl} - \theta_{supx}^{gait_deform} - \theta_{supx}^{deform_by_Mdmd} - \theta_{incl_bodysupx}^{err} + \theta_{ground_supx}^{err_estm} \quad (8.7)$$

ここで，右辺第 2 項と第 3 項は，フィードバックに頼らずにM_{supx}^{gait}， M_{supx}^{dmd}およびM_{dbv}^{dmd}を瞬時に発生させるためのフィードフォワード補償量に相当する．

また，右辺の$\theta_{incl_bodysupx}^{err}$は，上体傾き偏差支持脚座標系$X$成分であり，上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$の支持脚座標系での$X$成分である．以降，「上体傾き偏差支持脚$X$成分」を「上体傾き偏差$X$成分」と省略する．$\theta_{supx}^{cmpl}$の決定において上体傾き偏差$X$成分$\theta_{incl_bodysupx}^{err}$を減じることにより，コンプライアンス制御における$\theta_{incl_bodysupx}^{err}$の影響を打ち消すことができる．すなわち， $\theta_{incl_bodysupx}^{err}$によって直接的に発生する支持脚足部のたわみ角や床反力モーメントを打ち消すことができる．

また，右辺の$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$は，推定支持脚床傾斜角偏差$X$成分であり，支持脚床傾斜角偏差$X$成分$\theta_{ground_supx}^{err}$の推定値である． $\theta_{ground_supx}^{err}$は，Fig.8.14 のように，実際の支持脚床傾斜角（支持脚の接地面の傾斜角）のX成分と想定支持脚床傾斜角のX成分との差である．Fig.8.14 の状況では， $\theta_{ground_supx}^{err}$は負である．（想定支持脚床傾斜角は，目標歩容を生成する際に想定した目標支持脚 COP での床傾斜角であり，支持脚足部が床に面接触している状況では，目標歩容の支持脚足部姿勢θ_{sup}^{gait}の傾斜角成分に一致する．）

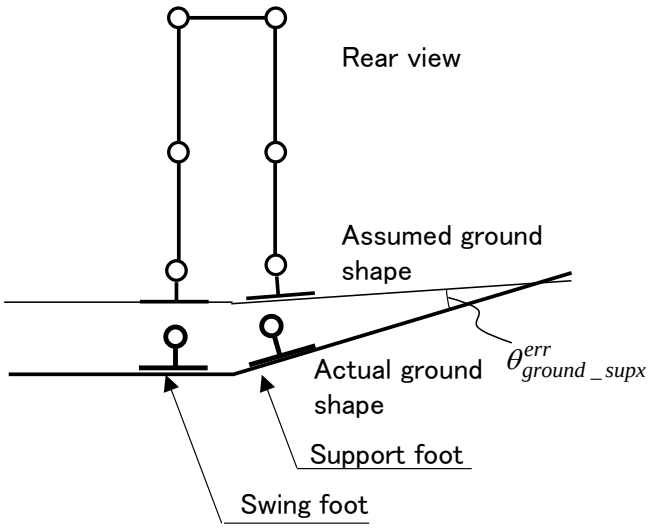


Fig.8.14 Ground inclination at support foot

推定支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$は，後述する床形状偏差推定器によって推定される．$\theta_{supx}^{cmpl}$の決定において，$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を加えることにより，$\theta_{ground_supx}^{err}$の影響を打ち消すことができる．

支持脚足部コンプライアンス角Y成分θ_{supy}^{cmpl}，遊脚足部コンプライアンス角X成分θ_{swgx}^{cmpl}および遊脚足部コンプライアンス角Y成分θ_{swgy}^{cmpl}も，同様に求められるものとする．

8.6 補償目標歩容決定

Fig.8.4 内の補償目標歩容決定部（Calculation of compensated target foot posture and position）において，θ_{dbv}^{cmpl}，$\theta_{supx/y}^{cmpl}$および$\theta_{swgx/y}^{cmpl}$によって，目標支持脚/遊脚足部位置$x_{sup/swg}^{gait}$と目標支持脚/遊脚足部姿勢$\theta_{sup/swg}^{gait}$を修正することで，補償目標支持脚/遊脚足部位置$x_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$と補償目標支持脚/遊脚足部姿勢$\theta_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$が決定される．

具体的には，まず，Fig.8.15 のごとく，目標支持脚/遊脚 COP $x_{sup/swg}^{gaitCOP}$が目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$を中心にベクトルVまわりに両脚コンプライアンス角θ_{dbv}^{cmpl}だけ回転（公転）するように，目標支持脚/遊脚足部を平行移動させる．以降，以上のように両脚コンプライアンス角θ_{dbv}^{cmpl}を決定し，この角度に応じて目標支持脚/遊脚足部を平行移動させる動作を，両脚コンプライアンス動作と呼ぶ．

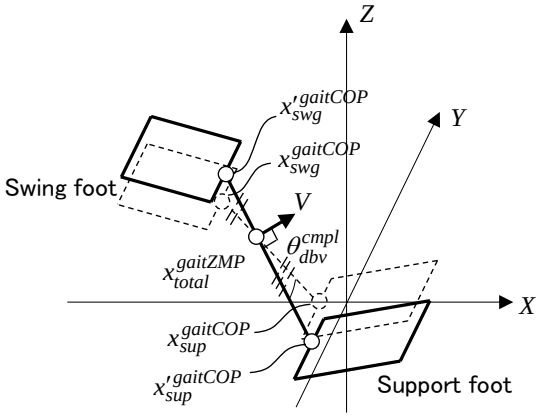


Fig.8.15 Double foot compliant motion

次いで，平行移動した目標支持脚足部を，Fig.8.16 のように，修正された目標支持脚 COP $x'^{gaitCOP}_{sup}$を中心に目標支持脚座標系Y軸方向まわりに支持脚足部コンプライアンス角Y成分θ_{supy}^{cmpl}だけ回転させ，さらに，修正された目標支持脚 COP $x'^{gaitCOP}_{sup}$を中心に目標支持脚座標系X軸方向まわりに支持脚足部コンプライアンス角X成分θ_{supx}^{cmpl}だけ回転させることで，補償目標支持脚足部位置$x_{sup}^{cmpnd_gait}$と補償目標支持脚足部姿勢$\theta_{sup}^{cmpnd_gait}$が決定される．以降，以上のように支持脚足部コンプライアンス角θ_{sup}^{cmpl}を決定し，この角度に応じて目標支持脚足部姿勢を回転させる動作を，支持脚足部コンプライアンス動作と呼ぶ．

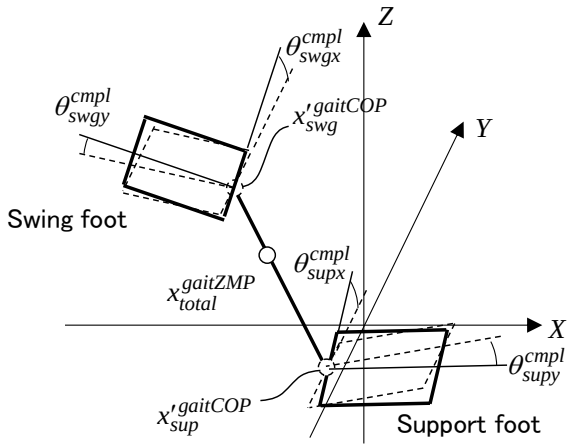


Fig.8.16 Foot compliant motion

同様に，平行移動した目標遊脚足部を，Fig.8.16 のように，修正された目標遊脚 COP $x'^{gaitCOP}_{swg}$を中心に遊脚座標系Y軸方向まわりに遊脚足部コンプライアンス角Y成分θ^{cmpl}_{swgy}だけ回転させ，さらに，修正された目標遊脚 COP $x'^{gaitCOP}_{swg}$を中心に遊脚座標系X軸方向まわりに遊脚足部コンプライアンス角X成分θ^{cmpl}_{swgx}だけ回転させることによって，補償目標遊脚足部位置$x^{cmpnd_gait}_{swg}$と補償目標遊脚足部姿勢$\theta^{cmpnd_gait}_{swg}$が決定される．以降，以上のように遊脚足部コンプライアンス角θ^{cmpl}_{swg}を決定し，この角度に応じて目標遊脚足部姿勢を回転させる動作を，遊脚足部コンプライアンス動作と呼ぶ．

支持脚足部コンプライアンス動作と遊脚足部コンプライアンス動作を合わせて，足部コンプライアンス動作と呼ぶ．さらに，両脚コンプライアンス動作と足部コンプライアンス動作を協調させた動作を，複合コンプライアンス動作と呼ぶ．

8.7 床形状偏差推定

Fig.8.4 内の床形状偏差推定器（Estimation of ground shape）の機能ブロック図を，Fig.8.17 に示す．

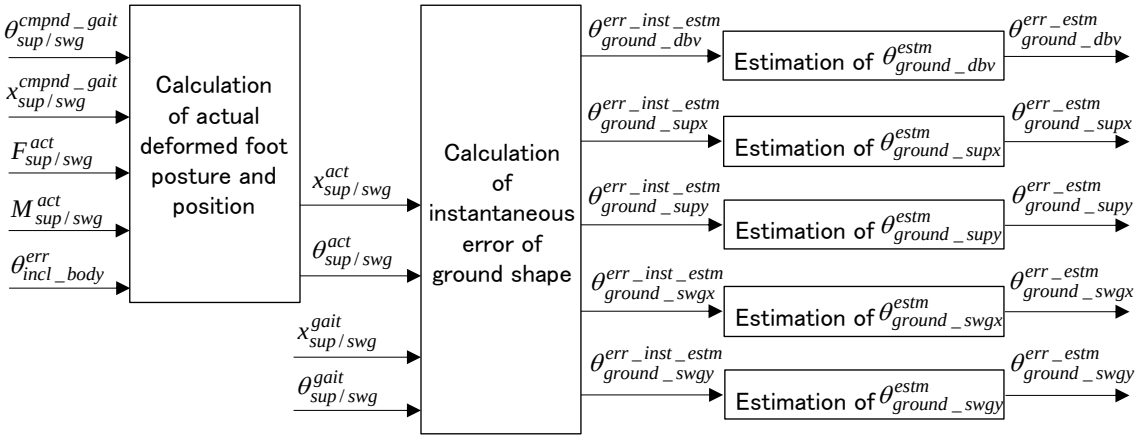


Fig.8.17 Estimation of ground shape

床形状偏差推定器では，まず，瞬時実足部位置姿勢算出部（Calculation of actual deformed foot posture and position）において，足部柔軟構造の弾性変形モデルを用いて，実支持脚/遊脚床反力$F_{sup/swg}^{act}$，$M_{sup/swg}^{act}$による足部柔軟構造のたわみ（この内の並進たわみを，実支持脚足部並進たわみ$x_{sup/swg}^{act_deform}$，たわみ角を，実支持脚足部たわみ角$\theta_{sup/swg}^{act_deform}$と呼ぶ）を求め，これを補償目標支持脚/遊脚足部位置・姿勢$x_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$，$\theta_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$に加え（合成し），さらに上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$の分だけ目標 ZMP まわりに位置・姿勢を回転（公転・自転）させることによって，実支持脚/遊脚足部位置・姿勢$x_{sup/swg}^{act}$，$\theta_{sup/swg}^{act}$が求められる．

次いで，瞬時床形状偏差算出部（calculation of instantaneous error of ground shape）において，実支持脚/遊脚足部位置・姿勢$x_{sup/swg}^{act}$，$\theta_{sup/swg}^{act}$を基に，瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$，瞬時支持脚/遊脚床傾斜角偏差$\theta_{ground_sup/swg}^{err_inst_estm}$が算出される．

瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$は，両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$の瞬時的な推定値であり，目標支持脚 COP に対応する上記実支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する上記実遊脚足部の点を結んだ線分の傾斜角と想定両脚間床傾斜角の差である．

瞬時支持脚/遊脚床傾斜角偏差$\theta_{ground_sup/swg}^{err_inst_estm}$は，支持脚/遊脚床傾斜角偏差$\theta_{ground_sup/swg}^{err}$の瞬時的な推定値であり，上記実支持脚/遊脚足部姿勢$\theta_{sup/swg}^{act}$と想定支持脚床傾斜角との差である．

床形状偏差推定器では，次いで，両脚間床傾斜角偏差推定器によって，推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が推定される．Fig. 8. 18 に，同推定器のフローチャートを示す．

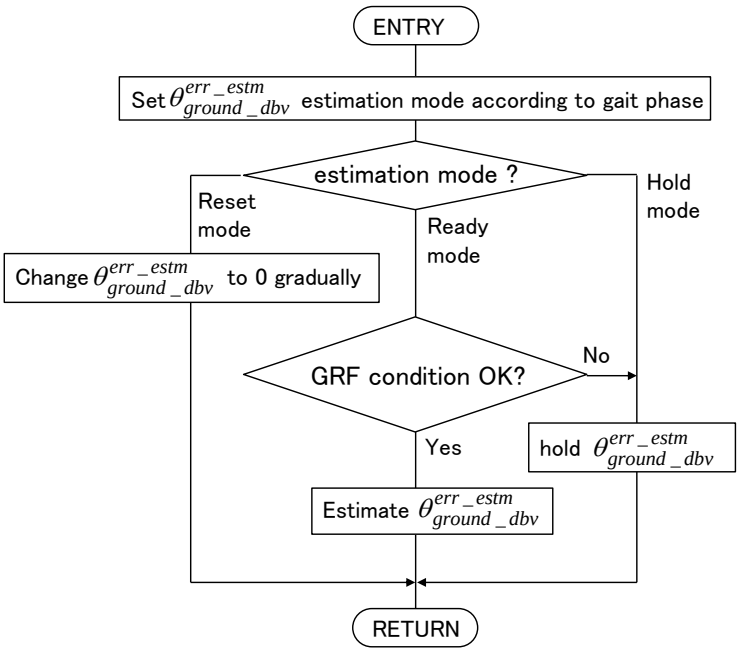


Fig.8.18 Flow chart for estimation of ground inclination between both feet

同推定器では，まず，両脚間床傾斜角偏差推定モードを目標歩容のフェーズによって決定する．

Fig.8.19 に,歩行の一歩の期間の両脚間床傾斜角偏差推定モードの例を示す.この例では,両脚支持期直前に Reset モードから Ready モードに移り，両脚支持期から片脚支持期に切り替わると Hold モードに移り，少し後に，Reset モードとなる．

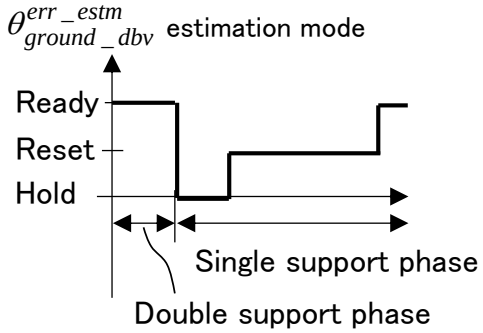


Fig.8.19 Estimation mode of ground inclination between both feet

フローチャートに戻って説明を続けると，次いで，両脚間床傾斜角偏差推定モードに応じて処理が分岐する．

両脚間床傾斜角偏差推定モードが Ready モードである場合，両脚間床傾斜角用床反力条件を判定する．同床反力条件が OK であるとは，床反力に関する以下の禁止条件 1 から禁止条件 4 のいずれにも該当しないことである．ただし，F_{min}, r_{min}は，目標歩容に応じて設定された許容値であり，F_{min}は正の値，r_{min}は，2 分の 1 未満の正の値に設定される．

禁止条件 1：

$$F^{act}_{supz} < F_{min} \tag{8.8}$$

（実支持脚床反力鉛直成分が小さ過ぎて，目標支持脚 COP に対応する実支持脚足部の点が接地していないおそれがある.）

禁止条件 2：

$$F^{act}_{swgz} < F_{min} \tag{8.9}$$

（実遊脚床反力鉛直成分が小さ過ぎて，目標遊脚 COP に対応する実遊脚足部の点が接地していないおそれがある.）

禁止条件 3：

$$\left(\frac{F_{swgz}^{act}}{F_{supz}^{act} + F_{swgz}^{act}} < r_{min} \right) and \left(\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm} > \theta_{ground_dbv}^{err_estm} \right) \tag{8.10}$$

（目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$に作用する実支持脚床反力鉛直成分F_{supz}^{act}と目標遊脚 COP に作用する実遊脚床反力鉛直成分F_{swgz}^{act}との合力の作用点が，目標支持脚 COP に寄り過ぎていて，かつ，推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が増える方向（遊脚足部が床から浮く方向）に修正されようとしている．（後述するように，推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$は，瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$に追従するように決定される．））

禁止条件 4：

$$\left(\frac{F_{supz}^{act}}{F_{supz}^{act} + F_{swgz}^{act}} < r_{min} \right) and \left(\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm} < \theta_{ground_dbv}^{err_estm} \right) \tag{8.11}$$

（禁止条件 3 の支持脚と遊脚を入れ替えた条件）

Ready モードにおいて，上記床反力条件が OK である場合には，次式のように，瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$を時定数$T_{db}^{estm}$の 1 次ローパスフィルタに通すことで，推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を求める．

$$\theta_{ground_dbv}^{err_estm} = \frac{1}{1 + T_{db}^{estm} s} \theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm} \tag{8.12}$$

言い換えると，瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$に追従するように，推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が決定される．

補足すると，Fig. 8.11 のように，目標支持脚 COP に対応する実支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する実遊脚足部の点がいずれも床に接していれば，上記のごとく求められる瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$は，制御系振動などのノイズが含まれてはいるが，その瞬間における両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$を示しているはずである．そこで，$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$をローパスフィルタに通すことで，ノイズを除去した推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を得るようにした．

Ready モードにおいて，上記床反力条件が OK でない場合には，$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を保持する．より厳密には，上記ローパスフィルタの状態を保持することで，その出力である$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を保持する．

補足すると，上記床反力条件が OK でない場合には，目標支持脚 COP に対応する実支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する実遊脚足部の点のいずれかが床に十分に接していないおそ

れがあり，上記のごとく求められる瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$がその瞬間における両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$を示している保証がない．さらには，推定が発散するおそれがある．

これに関して以下に説明すると，上記ふたつの点がいずれも床に十分に接してない場合には，$\theta_{ground_dbv}^{err_e□tm}$が増加（または減少）することによって補償目標支持脚/遊脚足部位置が変化しても，F_{supz}^{act}とF_{swgz}^{act}はほとんど変化しない．したがって，$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$は，補償目標支持脚/遊脚足部位置の変化と共に変化してしまう．すなわち，$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が増加（または減少）すると，$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$も増加（または減少）し，さらに$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$に追従しようとして$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が増加（または減少）するポジティブ・フィードバック・ループが形成されるので，推定が発散する．

Reset モードでは，Reset モードの期間に $\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を滑らか，かつ徐々に 0 に戻す．より厳密には，上記ローパスフィルタの状態を滑らか，かつ徐々に 0 に戻すことで，その出力である$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を滑らか，かつ徐々に 0 に戻す．

Hold モードでは，Ready モードにおいて上記床反力条件が OK でない場合と同様に，$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を保持する．より厳密には，上記ローパスフィルタの状態を保持することで，その出力である$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$を保持する．

床形状偏差推定器では，次いで，支持脚床傾斜角偏差X成分推定器によって，推定支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$が推定される．Fig. 8. 20 に，同推定器のフローチャートを示す．

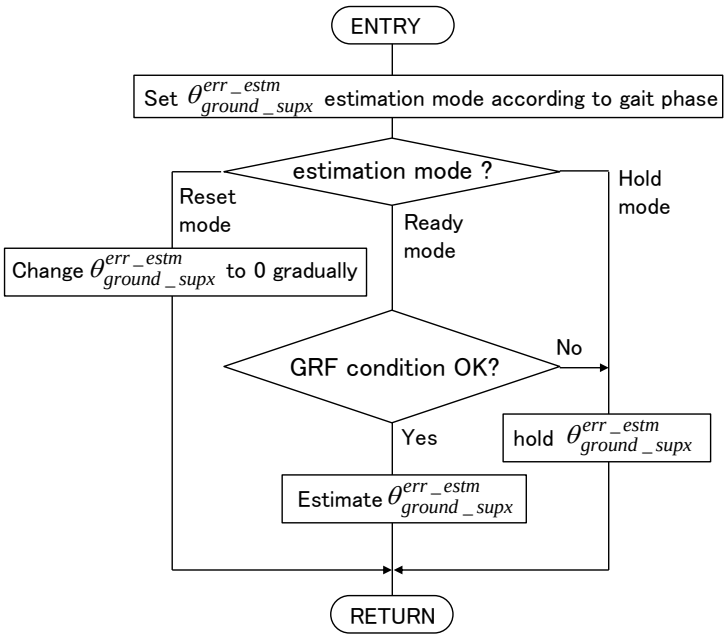


Fig.8.20 Flow chart for estimation of ground inclination at support foot

同推定器では，まず，支持脚床傾斜角偏差X成分推定モードを目標歩容のフェーズによって決定する．

Fig.8.21 に，歩行の一歩の期間の支持脚床傾斜角偏差X成分推定モードの例を示す．この例では，片脚支持期の終端直前から片脚支持期の終端までの期間（片脚支持期において支持脚足部が床に対して動いている期間）では Hold モードであり，それ以外では Ready モードである．

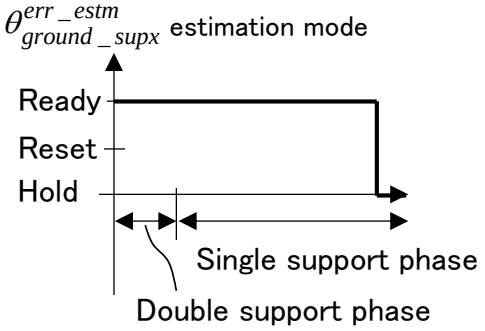


Fig.8.21 Estimation mode of ground inclination at support foot

フローチャートに戻って説明を続けると，次いで，支持脚床傾斜角偏差X成分推定モードに応じて処理が分岐する．

支持脚床傾斜角偏差X成分推定モードが Ready モードである場合，支持脚床傾斜角用床反力条件を判定する．同条件が OK であるとは，床反力に関する以下の禁止条件 1 から禁止条件 3 のいずれにも該当しないことである．ただし，$F_{foot_min}(>0), x^{COP}_{supy_min}(<0), x^{COP}_{supy_max}(>0)$は，目標歩容に応じて設定された許容値である．

禁止条件 1：

$$F^{act}_{supz} < F_{foot_min} \tag{8.13}$$

（実支持脚床反力鉛直成分F^{act}_{supz}が小さ過ぎて，目標支持脚 COP に対応する実支持脚足部の点とその近傍において，足部と床面が想定したような面接触（あるいは線接触）をしていない恐れがある．）

禁止条件 2：

$$\left(x^{actCOP}_{supy} < x^{COP}_{supy_min}\right) and \left(\theta^{err_inst_estm}_{ground_supx} < \theta^{err_estm}_{ground_supx}\right) \tag{8.14}$$

（実支持脚 COP x^{actCOP}_{sup}が支持脚座標系Y軸の負方向に大きくずれ過ぎていて（支持脚 COP 存在可能範囲の横の境界に近づき過ぎていて），かつ、実支持脚 COP x^{actCOP}_{sup}がさらに大きくずれる方向に推定支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta^{err_estm}_{ground_supx}$が修正されよ

うとしている．（後述するように，$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$は，瞬時支持脚床傾斜角偏差$X$成分$\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm}$に追従しようとして，減少（負方向に増加）しようとしている．））

禁止条件３：

$$\left(x_{supy}^{actCOP} > x_{supy_max}^{COP}\right) and \left(\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm} > \theta_{ground_supx}^{err_estm}\right) \tag{8.15}$$

（禁止条件２と逆方向の条件）

Ready モードにおいて，上記床反力条件が OK である場合には，次式のように，瞬時支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm}$を時定数$T_{foot}^{estm}$の１次ローパスフィルタに通すことで，推定支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を求める．

$$\theta_{ground_supx}^{err_estm} = \frac{1}{1+T_{foot}^{estm}s}\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm} \tag{8.16}$$

言い換えると，瞬時支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm}$に追従するように，推定支持脚床傾斜角偏差$X$成分$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$が決定される．

補足すると，Fig.8.14 のように，目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$に対応する実支持脚足部の点とその近傍において，足部と床面が想定したような面接触（あるいは線接触）をしていれば（すなわち足部の傾斜角X成分と床面の傾斜角X成分が一致するように足部が床に接していれば），上記のごとく求められる瞬時支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm}$は，制御系振動などのノイズが含まれてはいるが，その瞬間における推定支持脚床傾斜角偏差X成分を示しているはずである．そこで，$\theta_{ground_supx}^{err_inst_estm}$をローパスフィルタに通すことで，ノイズを除去した推定支持脚床傾斜角偏差X成分$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を得るようにした．

Ready モードにおいて，上記床反力条件が OK でない場合には，$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を保持する．より厳密には，上記ローパスフィルタの状態を保持することで，その出力である$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を保持する．

Reset モードでは，Reset モードの期間に，$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を滑らか，かつ徐々に 0 に戻す．より厳密には，上記ローパスフィルタの状態を滑らか，かつ徐々に 0 に戻すことで，その出力である$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を滑らか，かつ徐々に 0 に戻す．

Hold モードでは，Ready モードにおいて上記床反力条件が OK でない場合と同様に，$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を保持する．より厳密には，上記ローパスフィルタの状態を保持することで，その出力である$\theta_{ground_supx}^{err_estm}$を保持する．

床形状偏差推定器では，次いで，支持脚床傾斜角偏差Y成分推定器において，支持脚床傾斜

角偏差X成分推定器と同様の推定処理が行われる.

さらに，遊脚に関しても，遊脚床傾斜角偏差X/Y成分推定器において，同様の推定処理が行われる．ただし，歩行の一歩の期間の遊脚床傾斜角偏差X/Y成分推定モードは，例えば，Fig.8.22 のように設定される.

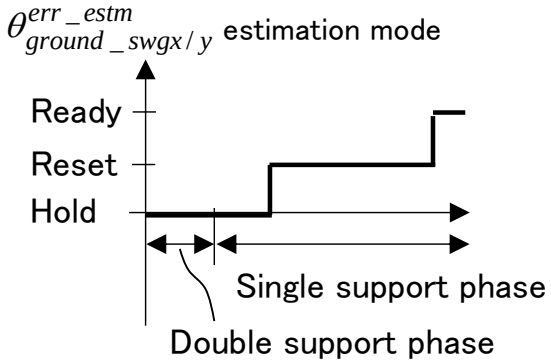


Fig.8.22 Estimation mode of ground inclination at swing foot

なお，両脚コンプライアンス動作に関して補足すると，Fig.8.15 のごとく，目標支持脚/遊脚 COP $x^{gaitCOP}_{sup/swg}$が目標 ZMP $x^{gaitZMP}_{total}$を中心にベクトルVまわりに両脚コンプライアンス角θ^{cmpl}_{dbv}だけ回転(公転)するように,目標支持脚/遊脚足部を平行移動させる代わりに,Fig.8.23 のように，目標支持脚/遊脚足部を鉛直方向に移動させてもよい.

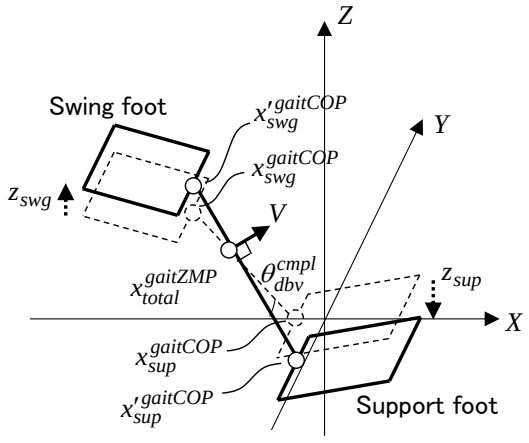


Fig.8.23 Variation of double foot compliant motion

8.8 段差通過時の複合コンプライアンス動作

Fig.8.24 に，平地を想定して歩行しているときに，想定していなかった下り段差に遭遇した場合の複合コンプライアンス制御の動作を模式的に示す.

①は，想定していなかった下り段差に遭遇し，目標歩容の両脚支持期に切り替わった直後

の状態を示す．（便宜上，今回の一歩の目標歩容において，両脚支持期の後に離床する脚を遊脚とし，もう一方を支持脚とするので，以降，脚の名称が実際の接地状態と異なることがあることに注意が必要である．）このとき，目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$は，目標遊脚 COP $x_{swg}^{gaitCOP}$から離れつつある．段差のために支持脚はまだ着地していないので，実支持脚床反力鉛直成分F_{supz}^{act}は 0 であり，F_{supz}^{act}とF_{swgz}^{act}が目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$まわりに作用するモーメント$M_{FsupzFswgz}^{act}$のベクトルV方向成分は正の値となる．

一方，目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$まわりに作用する実床反力モーメント（$M_{FsupzFswgz}^{act}$とM_{sup}^{act}とM_{swg}^{act}の合力）のベクトルV方向成分が正の値となるので，上体傾き偏差のベクトルVまわり成分$\theta_{incl_bodyv}^{err}$は，正の方向に増加（前傾）していく．よって，上体傾き偏差のベクトルVまわり成分$\theta_{incl_bodyv}^{err}$を 0 に収束させるための両脚コンプライアンスモーメント要求値M_{dbv}^{dmd}は，ベクトルVまわりの負のモーメントとなる．

これらのことから，$(M_{FsupzFswgz}^{act}-M_{dbv}^{dmd})$は③に示すように正となるので，Fig.8.9 のブロック線図で求められるベクトルVまわりの両脚コンプライアンス基本角$\acute{\theta}_{dbv}^{cmpl}$は正となり，補償目標支持脚（前脚）足部が補償目標遊脚（後脚）足部に対して下がる．

ところで，①②のように実支持脚足部が接地していない状況では，実支持脚床反力が発生しないので，支持脚足部柔軟構造のたわみがほぼ 0 と推定される．一方，実遊脚床反力鉛直成分F_{swgz}^{act}は，目標遊脚床反力鉛直成分F_{swgz}^{gait}よりも大きくなるので，遊脚足部柔軟構造のたわみは，想定より大きく推定（算出）される．このことと，上記のごとく補償目標支持脚（前脚）足部が下がることから，瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$は増加し（前下がりになり），推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{estm}$もこれに追従するように増加する（前下がりに推定される）．

推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が増加すると（前下がりになると），ますます補償目標支持脚足部が下がり，補償目標支持脚足部が下がると，さらに推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$が増加する（前下がりになる）．

この結果，やがて④のように支持脚（前脚）が接地する．

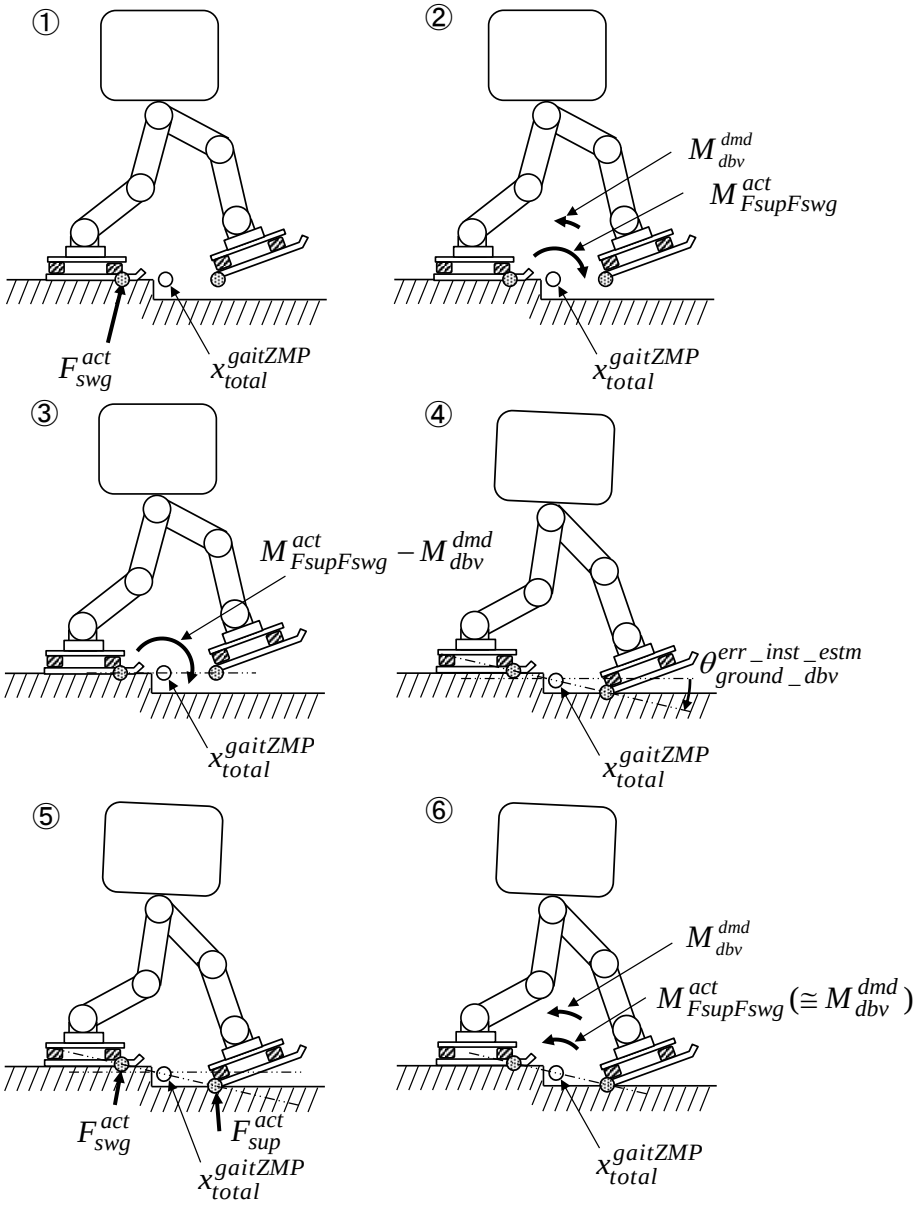


Fig.8.24 Motion of combined compliant control when walking down steps

支持脚が接地すると，⑤のように，F_{supz}^{act}が増加し，F_{swgz}^{act}が減少して，瞬時両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_inst_estm}$は，ほぼ実際の床面の両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$に収束し，推定両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err_estm}$も実際の床面の両脚間床傾斜角偏差$\theta_{ground_dbv}^{err}$に収束する．

また，⑥のように，$M_{FsupzFswgz}^{act}$はM_{dbv}^{dmd}に収束し，両脚コンプライアンス基本角$\acute{\theta}_{dbv}^{cmpl}$は 0 に収束する．

同様に，想定していなかった支持脚床傾斜角偏差がある状況では，推定支持脚床傾斜角偏差$\theta_{ground_supx/y}^{err_estm}$は，実際の床面の支持脚床傾斜角偏差$\theta_{ground_supx/y}^{err}$に収束し，$M_{supx/y}^{act}$は$M_{xupx/y}^{dmd}$に収束し，支持脚足部コンプライアンス基本角$X/Y$成分$\acute{\theta}_{supx/y}^{cmpl}$は 0 に収束する．（この

ことに関しては，次節で詳細を説明する.）遊脚床傾斜角偏差に関しても同様である.

また、前述のように，分配器によって，M_{dbv}^{dmd}，M_{sup}^{dmd}およびM_{swg}^{dmd}が，これらの和が床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}にほぼ一致するように決定されるので，結局，複合コンプライアンス制御によって，目標 ZMP まわりの実床反力モーメントM_{total}^{act}が床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}にほぼ一致するように制御される.

なお，Fig.8.24 の⑤のように支持脚のかかとが着地した直後では，実支持脚（前脚）COP のX座標は目標支持脚 COP $x_{sup}^{gaitCOP}$（かかと）のX座標と一致するので，支持脚足部コンプライアンス基本角Y成分θ_{supy}^{cmpl}は 0 となる．すなわち，不要な支持脚足部コンプライアンス動作が生じない.

8.9 複合コンプライアンス制御による上体位置・姿勢偏差挙動の倒立振子化

上記の複合コンプライアンス制御により，足首コンプライアンス制御と足首関節角度を操作する姿勢安定化制御とにおける前記 3 つの問題点（1.支持脚の接地面と遊脚の接地面の高低差を吸収できないこと，2.両脚支持期にかえって姿勢を転倒させる床反力モーメントを発生してしまうこと，3.コンプライアンス動作によって足首位置が水平方向に変動し，上体傾きの発振が生じ易いこと）が解消される.

補足すると，上記問題点 1 と 2 は，両脚コンプライアンス動作によって解消され，問題点 3 は，支持脚/遊脚足部コンプライアンス動作の回転中心が，足首位置でなく，床面に設定されていることによって解消される.

ところで,複合コンプライアンス動作を,接地している足部を床に接地させたまま行うと，Fig.8.25 のように，上体は，目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$を中心にして回転移動する．このことは，複合コンプライアンス制御によって，非線形性の強い上体位置・姿勢の運動偏差（実運動と目標運動の差）が，片脚支持期と両脚支持期の区別なく，目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$を支点とした単純な倒立振子の運動に修正された（拘束された）ことを意味する.

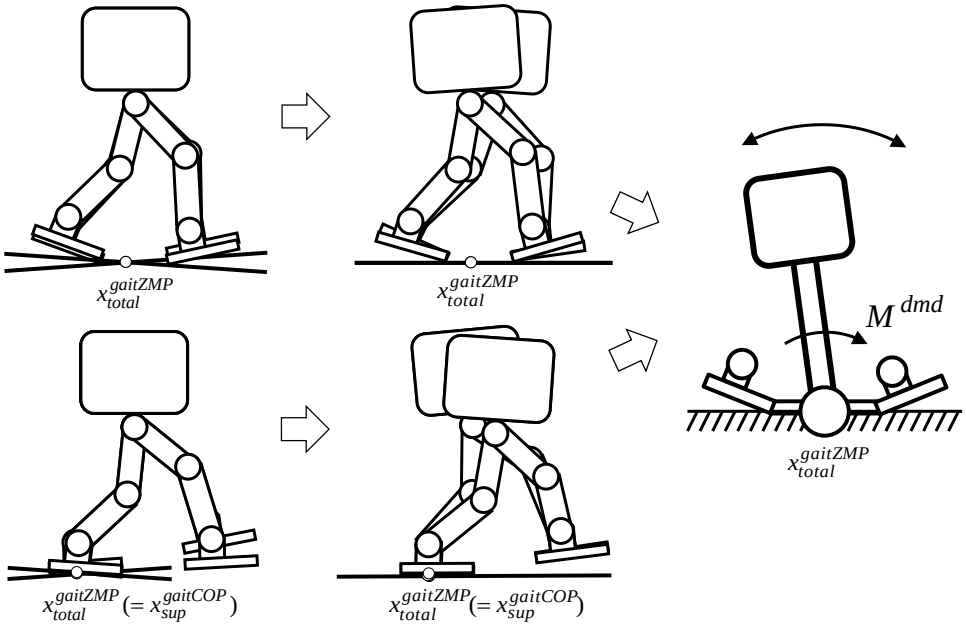


Fig.8.25 Upper body motion under combined compliant control

8.10 複合コンプライアンス制御下での上体傾き偏差の運動方程式

本節では，目標総慣性力（目標運動による総慣性力）と目標床反力がつり合っていることを前提として，複合コンプライアンス制御が働いている状況における上体傾き偏差の運動方程式を求める．

実運動と実床反力とは常につり合うことと上記前提より，挙動偏差（実運動と目標運動の差）による総慣性力は，床反力偏差（実床反力と目標床反力の差）とつり合う．したがって，複合コンプライアンス制御によって倒立振子化された上体位置・姿勢偏差の挙動は，その支点（目標 ZMP $x_{total}^{gaitZMP}$）まわりに作用する床反力モーメント偏差M_{total}^{err}に支配される．

ここで，実際のロボットの挙動が，走行歩容生成において用いた上体質点（倒立振子質点），両足部質点，フライホイールから成るモデルで表されるものとする．前節で述べたように，複合コンプライアンス動作によって，グローバル座標系（支持脚座標系）において，両足部の位置は維持されたまま，上体だけが目標 ZMP を中心とした回転運動をする．したがって，上体位置・姿勢偏差の運動だけが，目標 ZMP まわりの床反力モーメント偏差M_{total}^{err}に影響すると考えてよい．

上体位置・姿勢偏差の運動は，Fig.8.26 に示すように，6.5 節（フルモデル補正用摂動動力学モデル）で示した上体水平運動（上体を水平に平行移動させる摂動運動）と上体回転運動（全体重心位置を変えずに上体を傾ける摂動運動）の合成によって表すことができる．以下では，このことを利用して，複合コンプライアンス制御によって倒立振子化された上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$の運動方程式（上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$と床反力モーメント偏差M_{total}^{err}の関係）を導出する．

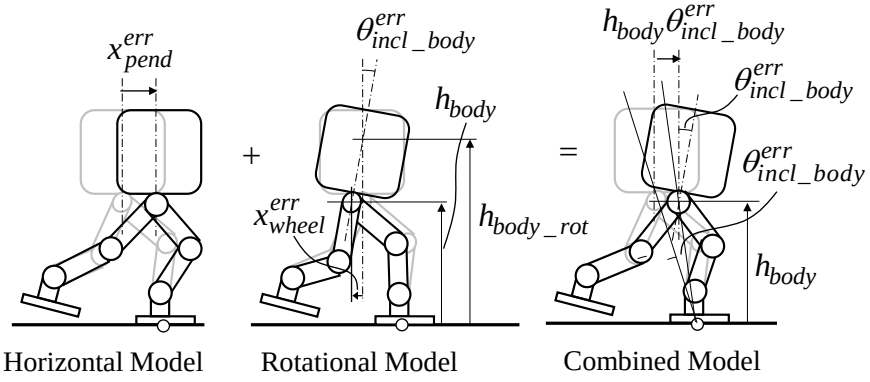


Fig.8.26 Upper body motion model under combined compliant control

なお本図では，上体の位置（上体の位置を示す代表点）を，両股関節の中点に置いた．（上体と一体となって移動する点であれば，他の点に置いてもよい．ただし，設定する点に応じて，以下のC_{wheel}の値が変わる．）

以下に，上体水平運動と上体回転運動に関する表記を列挙する．

上体水平運動用の倒立振子に関する表記：

x^{err}_{pend}: 倒立振子の水平位置（上体水平位置に対応）

M^{err}_{pend}: 倒立振子モーメント（上体水平運動によって発生する床反力モーメントに相当）

m_{pend} : 倒立振子質点質量

h_{pend}: 倒立振子高さ（一定値）

$\ddot{z}_{pend}$: 倒立振子の鉛直加速度

g: 重力加速度

上体回転運動用のフライホイールに関する表記：

$\theta^{err}_{incl_body}$: フライホイールの回転角（上体傾き偏差）

M^{err}_{wheel}: フライホイールモーメント

I_{wheel}: フライホイールイナーシャ（フルモデル補正用での値と同一）

x^{err}_{wheel}: 全体重心を維持するための上体水平位置補正量

C_{wheel}: 全体重心を維持するための上体水平位置補正量と上体傾きの比（フルモデル補正用での値と同一）

ロボットに関する表記：

h_{body}: 上体高さ（上体代表点の高さ．所定の固定値とする．）

h_{body_rot}: 上体回転中心高さ（上体回転運動における上体の瞬間回転中心（不動点）の高さ．h_{body}とC_{wheel}の値を基に，下記の式(8.24)によって求められる．）

倒立振子の運動方程式は，次式のようになる．

$$\ddot{x}_{pend}^{err} = \frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{h_{pend}} x_{pend}^{err} + \frac{1}{h_{pend} \cdot m_{pend}} M_{pend}^{err} \tag{8.17}$$

フライホイールの運動方程式は，次式のようになる．

$$M_{wheel}^{err} = I_{wheel} \ddot{\theta}_{incl_body}^{err} \tag{8.18}$$

全体重心を維持するための上体水平位置補正量は，次式で決定されるものとする．

$$x_{wheel}^{err} = C_{wheel} \theta_{incl_body}^{err} \tag{8.19}$$

複合コンプライアンス動作による上体位置・姿勢偏差の運動においては，目標 ZMP を回転中心として上体が回転移動するので，上体位置の水平変位は，$h_{body}\theta_{incl_body}^{err}$となる．したがって，次式が成立する．

$$h_{body}\theta_{incl_body}^{err} = x_{pend}^{err} + x_{wheel}^{err} \tag{8.20}$$

式(8.19) (8.20)より，次式を得る．

$$x_{pend}^{err} = \left(h_{body} - C_{wheel}\right)\theta_{incl_body}^{err} \tag{8.21}$$

ところで，上体回転運動によって，上体代表点は、上体回転中心まわりに上体傾き偏差だけ回転移動するので、全体重心を維持するための上体水平位置補正量x_{wheel}^{err}は，次式のように表される．

$$x_{wheel}^{err} = \left(h_{body} - h_{body_rot}\right)\theta_{incl_body}^{err} \tag{8.22}$$

上式を式(8.19)と比較することで，次の関係を得る．

$$C_{wheel} = h_{body} - h_{body_rot} \tag{8.23}$$

式(8.21) (8.23)より，次式を得る．

$$x_{pend}^{err} = h_{body_rot}\theta_{incl_body}^{err} \tag{8.24}$$

複合コンプライアンス動作によって発生する床反力は，複合コンプライアンス動作に含まれる上体水平運動成分と上体回転運動それぞれによって発生する床反力の和になるので，次式が成立する．

$$M_{total}^{err} = M_{pend}^{err} + M_{wheel}^{err} \tag{8.25}$$

式(8.17) (8.18) (8.24) (8.25)より，次式を得る．

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_{incl_body}^{err} = &\frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{\left(1 + \dfrac{I_{wheel}}{h_{body_rot}h_{pend} \cdot m_{pend}}\right)h_{pend}}\theta_{incl_body}^{err} \\ &+ \frac{1}{\left(1 + \dfrac{I_{wheel}}{h_{body_rot}h_{pend} \cdot m_{pend}}\right)h_{body_rot}h_{pend} \cdot m_{pend}}M_{total}^{err}\end{aligned} \tag{8.26}$$

ところで，質量 m_{pend}^{cmpl}，高さh_{pend}^{cmpl}，支点に作用するモーメントM_{total}^{err}の倒立振子の傾きを$\theta_{incl_body}^{err}$とすると，その運動方程式は次のようになる．

$$\ddot{\theta}_{incl_body}^{err} = \frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{h_{pend}^{cmpl}}\theta_{incl_body}^{err} + \frac{1}{{h_{pend}^{cmpl}}^2 \cdot m_{pend}^{cmpl}}M_{total}^{err} \tag{8.27}$$

式(8.26)と式(8.27)を比較して，以下の関係式を得る．

$$m_{pend}^{cmpl} = \frac{h_{body_rot}}{\left(1 + \dfrac{I_{wheel}}{h_{body_rot}h_{pend} \cdot m_{pend}}\right)h_{pend}}m_{pend} \tag{8.28}$$

$$h_{pend}^{cmpl} = \left(1 + \frac{I_{wheel}}{h_{body_rot}h_{pend} \cdot m_{pend}}\right)h_{pend} \tag{8.29}$$

すなわち，上体傾斜偏差$\theta^{err}_{incl_body}$の挙動は，式(8.28)(8.29)で算出される質量 m^{cmpl}_{pend}，高さh^{cmpl}_{pend}，支点に作用するモーメントM^{err}_{total}の倒立振子の傾きの挙動となる．

さらにここで，

$$\frac{I_{wheel}}{h_{body_rot}h_{pend}\cdot m_{pend}} << 1 \tag{8.30}$$

が成立する場合には，式(8.26)の近似式として，次式を得る．

$$\ddot{\theta}^{err}_{incl_body} \cong \frac{(g+\ddot{z}_{pend})}{h_{pend}}\theta^{err}_{incl_body} + \frac{1}{h_{body_rot}h_{pend}\cdot m_{pend}}M^{err}_{total} \tag{8.26´}$$

式(8.26´)と式(8.27)を比較して，以下の式を得る．

$$m^{cmpl}_{pend} = \frac{h_{body_rot}}{h_{pend}}m_{pend} \tag{8.28´}$$

$$h^{cmpl}_{pend} = h_{pend} \tag{8.29´}$$

すなわち，この場合では，上体傾斜偏差$\theta^{err}_{incl_body}$の挙動は，式(8.28´)(8.29´)で算出される質量 m^{cmpl}_{pend}，高さh^{cmpl}_{pend}，支点に作用するモーメントM^{err}_{total}の倒立振子の傾きの挙動となる．

以下では，複合コンプライアンス制御によって倒立振子化された上体傾き偏差$\theta^{err}_{incl_body}$の安定性について議論する．

床反力モーメント偏差M^{err}_{total}は，複合コンプライアンス制御によって，基本的には，姿勢安定化のための床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}に追従するように制御されるが，8.3節のように両脚コンプライアンスモーメント要求値M^{dmd}_{dbv}と支持脚/遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値$M^{dmd}_{sup/swg}$が決定されると，支持脚座標系（グローバル座標系）において，これらの合力のX成分が，床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}のX成分を越える場合がある．すなわち，これらの合力のX成分が，床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}に1を超えるゲインを乗じた値になることがある．床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}のY成分も同様である．この結果，姿勢安定化制御系のフィードバックゲインが，適正値よりも高くなり過ぎるおそれがある．しかし，床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}を，フルモデル補正における補正用倒立振子の安定化に用いる倒立振子安定化制御則（付録C）のように，発散成分にゲインを乗じることで決定すれば，ゲイン

が多少変化しても，オーバーシュートや振動の発生など，姿勢安定性に悪影響を及ぼすことはほとんどなくなる．また，この方法では，床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}の二乗平均値が小さくなり，接地圧分布が偏りにくくなるので，接地性を高めスピンを抑制する効果がある．

8.11 並進コンプライアンス制御

ここまで説明してきた複合コンプライアンス制御では，走行の着地時に床反力並進力の衝撃を吸収することができない．水平床面上の走行では，足部柔軟構造だけでも，着地衝撃を吸収することができるが，床の凹凸にも対応できるように，以下に述べる並進コンプライアンス制御を加えることが望ましい．

Fig.8.27 に示すように，目標 ZMP とロボット全体重心を結ぶ線分の方向ベクトルをUとする．また，目標全床反力の並進力ベクトルをF_{total}^{gait}，実全床反力の並進力ベクトルをF_{total}^{act}とする．

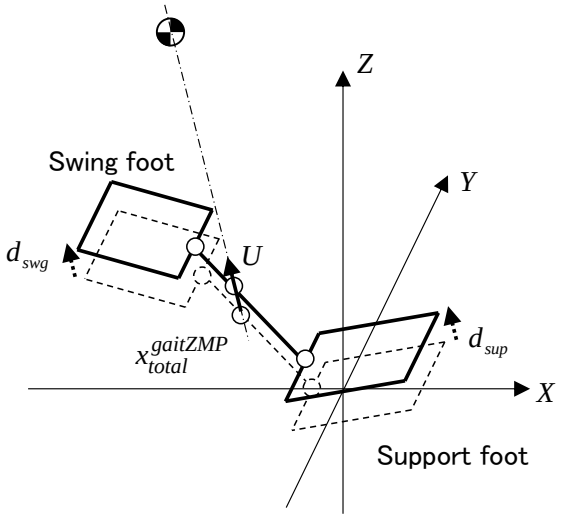


Fig.8.27 Parallel compliant motion

並進コンプライアンス制御は，次式のように，全床反力の並進力ベクトル偏差$(F_{total}^{act} - F_{total}^{gait})$の$U$方向成分に並進コンプライアンス制御ゲイン$K_F^{cmpl}$を乗じることで，支持脚/遊脚並進量（以降，$d_{sup/swg}$と表記する）を決定し，支持脚/遊脚足部を，$U$方向に$d_{sup/swg}$だけ平行移動させる制御である．

$$d_{\sup} = d_{swg} = K_F^{cmpl} U \cdot \left(F_{total}^{gait} - F_{total}^{act}\right) \tag{8.31}$$

すなわち，並進コンプライアンス制御は，全床反力の並進力偏差のU方向成分を低減するように，両足部を同じ量だけU方向に平行移動させる制御である．

複合コンプライアンス制御が決定した補償目標支持脚/遊脚足部位置$x_{sup/swg}^{cmpnd_gait}$を，並進コンプライアンス制御によって$d_{sup/swg}$だけ平行移動させることで，走行時の着地衝撃を低減す

ることができる．また，両足部をU方向に平行移動させることで，目標 ZMP まわりに余計な床反力モーメントが発生しないようにして，並進コンプライアンス制御に起因する上体姿勢の乱れを防ぐことができる．

ASIMO 実験機においては，並進コンプライアンス制御ゲインK_F^{cmpl}は，足部柔軟構造のコンプライアンス定数と同一とした．また，並進コンプライアンス制御の高周波数領域での開ループゲインを下げるためと，全床反力の並進力にダンピングを与えるために，式(8.31)の実全床反力の並進力ベクトルF_{total}^{act}には，１次のローパスフィルタに通した値を用いた．

8.12 足部柔軟構造の効果

以下に，コンプライアンス制御（この節では，床形状偏差推定を除く狭義の複合コンプライアンス制御の意味で用いる）と床形状偏差推定に対する足部柔軟構造（ガイド付きゴムブッシュと発泡ゴムインナーソール）の効果を列挙する．

a. 着地衝撃の吸収

足部柔軟構造の粘弾性によって，足部が着地するときに発生する着地衝撃の高周波数成分が吸収される．なお，ASIMO の通常の平地歩行においては，着地衝撃が最大となる瞬間は，かかとが着地した瞬間ではなく，足底が床に面接触した瞬間である．高減衰ゴムを用いると，着地衝撃のピークを数十%下げることができるが，一般的に減衰が高いゴムほど，粘弾性特性の温度依存性が高くなる傾向があるため，環境温度範囲を考慮してゴムを選択する必要がある．

b. コンプライアンス制御精度の向上

コンプライアンス制御は，高ゲインのモータ速度・変位制御によって足部の位置・姿勢を操作して，足部柔軟構造のたわみを制御することで，間接的に床反力を制御する．したがって，足部柔軟構造を十分に柔らかく設定することで，コンプライアンス制御によって制御される床反力に対するリンクのたわみの影響や減速機などの関節摩擦の影響を低減することができる．

c. コンプライアンス制御の安定性向上

コンプライアンス制御の開ループゲインは，足部柔軟構造のバネ定数に比例する．したがって，足部柔軟構造のバネ定数を下げることで，開ループゲインが下がり，発振しにくくなる．

d. コンプライアンス制御と床形状偏差推定の非干渉化による応答性の向上

床に対する足部上部側（足部柔軟構造より上側の足部部分）の相対位置・姿勢と床反力の関係のリニアリティが高くなるので，コンプライアンス制御と床形状偏差推定を高精度に非干渉化できる．このため，床形状偏差推定に遅れがあっても，コンプライアンス制御が発振しにくくなり，また逆に，コンプライアンス制御によって足部の位置・姿

勢が操作されても，床形状偏差推定に影響しにくくなる．この結果，コンプライアンス制御の応答性と安定性が向上し，床形状偏差推定の応答性も向上する．

e.床弾性に対するロバスト性向上

床が剛体でなく，じゅうたんのように弾性を有する場合，コンプライアンス制御と床形状偏差推定にとっては，足部柔軟構造の弾性が，足部柔軟構造の弾性と床の弾性の和（直列バネ）に変わったことと等価である．したがって，足部柔軟構造が床弾性よりも十分に柔軟であれば，コンプライアンス制御と床形状偏差推定の応答性・精度への床弾性の影響は，無視できる．

f.複合コンプライアンス動作の支点のぐらつき防止

足部柔軟構造におけるゴムブッシュを囲むガイドにより，足部の上部側に対して下部側は，上下の並進，ロール回転，ピッチ回転の機械的コンプライアンスを持ち，前後左右の並進，ヨー回転は拘束される．この拘束によって，複合コンプライアンス動作の回転中心が水平方向にぐらつきにくくなり，姿勢制御系が発振しにくくなる．(回転中心の水平方向のぐらつきが発生すると，これに起因してロボットの姿勢角度・角速度が変化し，ロボットの姿勢角度・角速度フィードバックループが発振し易くなる.）また，鉛直軸まわりのロボットの余計な回転運動（向きのぶれ）が抑制されるので，姿勢の乱れと進行方向の偏差が低減される．

8.13 まとめ

本節では，床の想定外の凹凸が各脚床反力に及ぼす影響を低減すると共に，姿勢を安定化するための床反力モーメント要求値を目標 ZMP まわりに発生させることをねらいとする「複合コンプライアンス制御」を提案した．

複合コンプライアンス制御は，

1）床反力モーメント要求値を，両脚コンプライアンスモーメント要求値M_{dbv}^{dmd}と支持脚/遊脚足部コンプライアンスモーメント要求値$M_{sup/swg}^{dmd}$に分配し，
2）6 軸力センサによって検出される実支持脚/遊脚床反力の並進力成分が目標 ZMP まわりに作用するモーメントが，M_{dbv}^{dmd}に近づくように，目標 ZMP まわりに両足部を公転させ，
3）さらに，実支持脚/遊脚床反力モーメントが$M_{sup/swg}^{dmd}$に近づくように，目標支持脚/遊脚 COP まわりに支持脚/遊脚足部を自転させる

制御である．

床形状偏差推定器は，実床反力から足部柔軟構造のたわみを推定し，これと両足部の位置・姿勢から推定両脚間床傾斜角と推定支持脚/遊脚床傾斜角偏差を求める推定器である．

これらの推定値を複合コンプライアンス動作に加えることで，床形状偏差（実床形状と想定床形状の差)に起因する各脚床反力の定常偏差(実床反力と目標床反力との間の定常偏差)

を打ち消すことができる.

複合コンプライアンス制御により，片脚支持期，両脚支持期いずれにおいても，上体位置・姿勢偏差の挙動は，目標 ZMP を支点とする倒立振子の挙動とほぼ等しくなるので，姿勢安定化制御設計が容易になる.

なお，複合コンプライアンス動作は，多脚ロボットのコンプライアンス制御に拡張することも可能である。(関連する国内登録特許[17])

第９章．大局的姿勢安定化制御

第９章. 大局的姿勢安定化制御

9.1 はじめに

人は、歩行中あるいは直立中に倒れそうになると，足裏の一部を床に強く押し付けて踏ん張り，それでもこらえきれなくなると，足腰の運びを変えたり足を踏み出したりして姿勢の回復を試みる．本章では，この機能をロボットにおいて実現することをねらいとした大局的姿勢安定化制御を提案する．

以下，9.2 節において，大局的姿勢安定化制御の基本原理を説明した後，9.3 節において，大局的姿勢安定化制御のコア技術であるモデル ZMP 制御が働いた場合の上体傾き偏差の挙動を表す運動方程式を導出する．9.4 節では，ヒューマノイドロボット P1 および P2 に導入した簡易型大局的姿勢安定化制御システムを説明する．9.5 節では，ASIMO で開発を進めている発展型大局的姿勢安定化制御システムの概要を述べる.9.6 節では,走行のように水平床反力(摩擦力）に制限がある歩容に対応できるモデル ZMP 制御を説明する．最後に 9.7 節において，本章をまとめる．

9.2 大局的姿勢安定化制御の基本原理

大局的姿勢安定化制御は，前述の「床反力制御（複合コンプライアンス制御）」に、「モデル ZMP 制御」と「長期シナリオ修正制御」とを加えた 3 つのコア技術から成る．以下では，目標歩行歩容の床反力の並進力鉛直成分がほぼ一定であることを前提にして，モデル ZMP 制御と長期シナリオ修正制御の概要を説明する．

3.2.3 節では，転倒力モーメントは，実 COP と目標 ZMP との距離にほぼ比例することを述べた．（なお，「転倒力モーメント」と「復元力モーメント」は，物理的には同じものであり，上体傾き偏差を増大させる場合と低減させる場合で表現を使い分けているだけである．よって，以降の議論では，「復元力モーメント」に統一する．）

複合コンプライアンス制御は，復元力モーメントを得るために実 COP を操作する制御であると言える．しかし，実 COP（厳密には実 COP’）は支持多角形内にしか存在できないので，実床反力モーメントには限界がある．言い換えると，踏ん張りには限界がある．例えば，Fig.9.1 は，歩行中に前に倒れそうになって，複合コンプライアンス制御によって姿勢を復元させようとしている状態を表しているが，この状態では，これ以上つま先側を下げても，実 COP は前に移動しないので，復元力モーメントは増加しない．

これに対し，モデル ZMP 制御は，より一層の復元力モーメントを得るために，実 COP の代わりに目標 ZMP を操作する制御である．歩容生成用の動力学モデルの ZMP を操作することから，「モデル ZMP 制御」と名付けた．

以下に，モデル ZMP 制御の具体的な働きを，Fig.9.1 の状態を例にとって説明する．

モデル ZMP 制御は，この状態から Fig.9.2 のように，歩容生成用の動力学モデルの上体に，倒れそうな方向（この場合は前向き）の仮想外力（Virtual external force）を作用させ，上体を同方向に加速させる．この結果，目標 ZMP（目標総慣性力の作用線と床面の交点）は後方に移動し，実 COP と目標 ZMP の差が増大する．つまり，モデル ZMP 制御により，床反力制御の限界を超えて，さらに復元力モーメントが増大する．

上記のように，モデル ZMP 制御は，仮想外力によって目標歩容の総慣性力と床反力のバランスを崩すことで姿勢を回復させる（より厳密には，上体傾き偏差を 0 に収束させる）制御であると言える．ただし，モデル ZMP 制御は，床反力制御と異なり，全体重心位置を復元する効果を持つとは限らない．上記の例では，むしろ倒れる方向に重心が加速される．

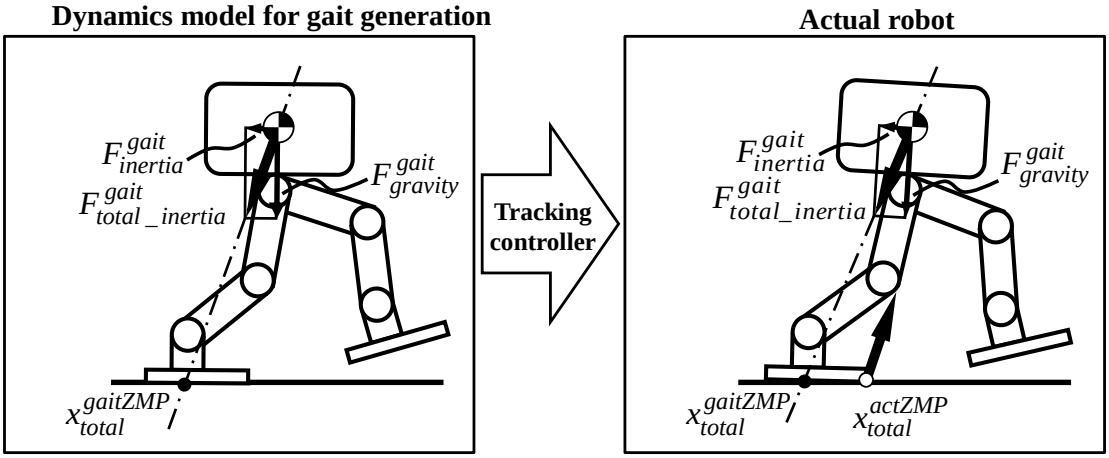


Fig.9.1 Robot trying to recover its posture using GRF control

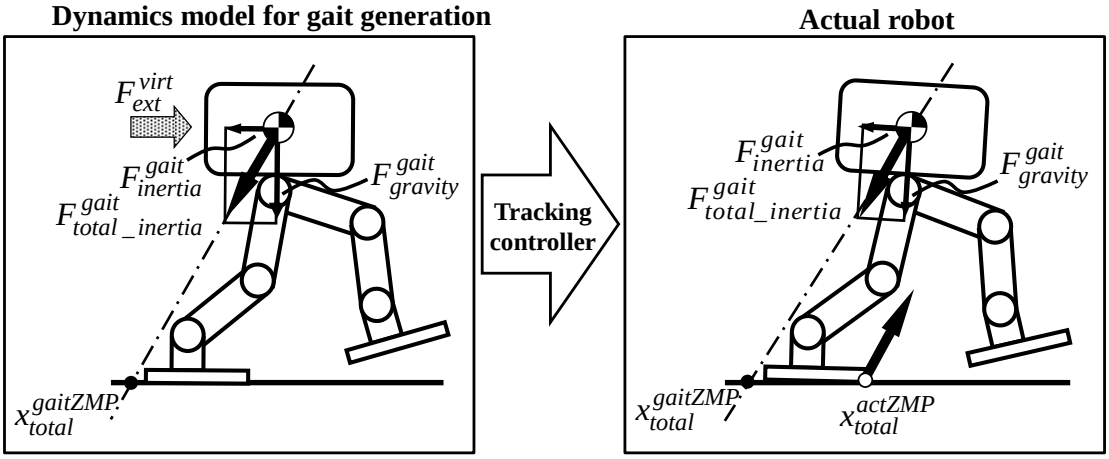


Fig.9.2 Robot trying to recover its posture using model ZMP control

あらかじめ設定された目標 ZMP 軌道を満足するように上体位置軌道を生成する手法では，上体位置の挙動が発散傾向になる．したがって，仮想外力によって歩容生成用の動力学モデルの上体が水平方向に少しでも加速されると，上体の軌道は，仮想外力が作用しなかった場合の軌道からずれて発散する．例えば，Fig.9.2 の状態で一瞬でも仮想外力によって上体を前に加速すると，その後，Fig.9.3 の点線のように，目標歩容の全体姿勢は，足部に対して上体が前に行き過ぎた不自然な姿勢になる．目標 ZMP 軌道を満足するように，さらに歩容を生成し続けると，上体と足部の位置・姿勢関係を満足する関節角の組が存在しなくなり破綻する．

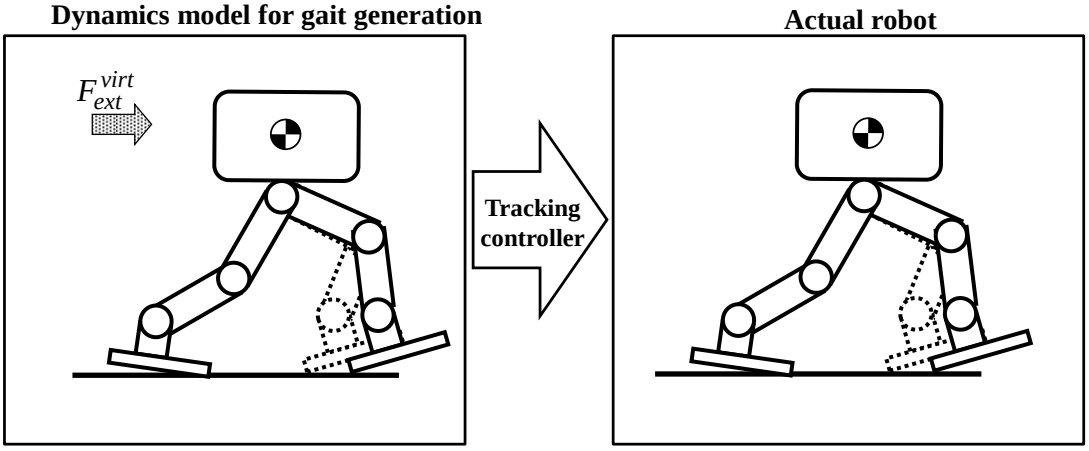


Fig.9.3 Changing step width

長期シナリオ修正制御は，この問題を解消するために，仮想外力によって変更された状態を初期値として，改めて長期的に正常な目標歩容を作り直す制御である．

Fig.9.3 の点線のように,足部に対して上体が前に行き過ぎた不自然な姿勢になりそうな場合には，例えば，Fig.9.3 の実線のように今回歩容の歩幅を大きくする．ただし，歩幅の修正量が不適切であると，次回歩容の目標 ZMP 軌道が，支持多角形から逸脱してしまうか，あるいは復元力余裕の少ない軌道になってしまう．そこで，次回歩容の目標 ZMP 軌道が適切になる今回歩容の歩幅を，探索的に求めるか，あるいは，上体の位置・速度，歩行周期などを基にマップによって決定する．（あらかじめシミュレーションによって，上体の位置・速度および歩行周期の組に対する適切な歩幅を探索して，マップ化しておく．なお，ロボット全体を 1 質点の線形倒立振子で近似した場合には，発散成分に着目することで，解析的に歩幅を決定することができる．）

モデル ZMP 制御は，複合コンプライアンス制御（床反力制御）がないと，有効に働かない．例として，Fig.9.4 に，Fig.9.1 と同一の姿勢において，複合コンプライアンス制御を働かせずに，モデル ZMP 制御だけを働かせて，少しの時間，経過した状態を示す．モデル ZMP 制御によって上体が後ろに傾いていくが，それにつれて，足底も床面に対して後ろに傾いていくので，実 COP が徐々にかかと側に移動してしまい，実 COP と目標 ZMP の差（復元力モーメント）は，複合コンプライアンス制御が働いている場合に較べ低下する．（Fig.9.4 では，片脚支持期の場合を示したが，特に，歩幅が大きい歩行の両脚支持期では，この傾向がより顕著になる．）すなわち，モデル ZMP 制御は，複合コンプライアンス制御との併用によってこそ効果的に働く制御である．

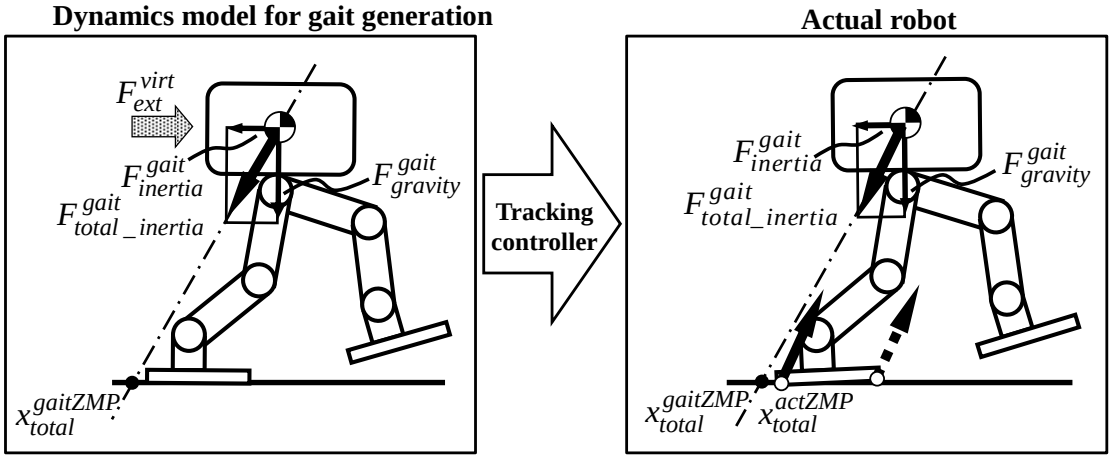


Fig.9.4 Model ZMP control without GRF control

9.3 モデル ZMP 制御が働く場合の上体傾き偏差の運動方程式

以下では，複合コンプライアンス制御が働いている状況で，歩容生成用の動力学モデルの上体に仮想外力が作用した場合の上体傾き偏差の運動方程式を求める．この場合，目標運動による総慣性力は，目標床反力と仮想外力との合力とつり合う．一方，実運動と実床反力は常につり合う．したがって，挙動偏差（実運動と目標運動の差）による総慣性力は，床反力偏差（実床反力と上記合力の差）とつり合う．以下では，特に，目標 ZMP まわりのモーメントのつり合いに注目する．

床反力偏差が目標 ZMP まわりに作用するモーメントを，床反力モーメント偏差M_{total}^{err}と呼び，仮想外力が目標 ZMP まわりに作用するモーメントを，仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}と呼ぶこととする．仮想外力が作用しない場合の上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$の運動方程式が式(8.27)で表されるのに対して，上記つり合いの関係より，仮想外力が作用する場合の上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$の運動方程式は，次式のように，質量 m_{pend}^{cmpl}，高さh_{pend}^{cmpl}，支点に作用するモーメント$\left(M_{total}^{err} - M_{ext}^{virt}\right)$の倒立振子の運動方程式になる．

$$\ddot{\theta}_{incl_body}^{err} = \frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{h_{pend}^{cmpl}} \theta_{incl_body}^{err} + \frac{1}{{h_{pend}^{cmpl}}^2 \cdot m_{pend}^{cmpl}} \left(M_{total}^{err} - M_{ext}^{virt}\right) \quad (9.1)$$

さらに，複合コンプライアンス制御によって，実床反力モーメントが床反力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}に一致するように制御されるものとすると，仮想外力が作用する場合の上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$の運動方程式は，次式のようになる．

$$\ddot{\theta}_{incl_body}^{err} = \frac{(g + \ddot{z}_{pend})}{h_{pend}^{cmpl}} \theta_{incl_body}^{err} + \frac{1}{{h_{pend}^{cmpl}}^2 \cdot m_{pend}^{cmpl}} \left(M_{GRF}^{dmd} - M_{ext}^{virt}\right) \quad (9.2)$$

なお，式(8.30)が成立する場合には，式(9.2)の近似式は，次式となる．

$$\ddot{\theta}^{err}_{incl_body} \cong \frac{(g+\ddot{z}_{pend})}{h_{pend}}\theta^{err}_{incl_body} + \frac{1}{h_{body_rot}h_{pend}\cdot m_{pend}}\left(M^{dmd}_{GRF} - M^{virt}_{ext}\right) \quad (9.2\text{´})$$

したがって，上体傾き偏差を安定化させるためには，まず，式(9.2)または式(9.2´)において，$\left(M^{dmd}_{GRF} - M^{virt}_{ext}\right)$を入力として上体傾き偏差を安定化させる入力を求め，これを復元力モーメント要求値M^{dmd}とする。さらに，次式を満足するように，床反力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}と仮想外力モーメントM^{virt}_{ext}を決定すれば良い。

$$M^{dmd}_{GRF} - M^{virt}_{ext} = M^{dmd} \quad (9.3)$$

9.4 簡易型大局的姿勢安定化制御システム

Fig.9.5 に，ヒューマノイドロボット P1 および P2 に導入した簡易型大局的姿勢安定化制御システムを示す．本システムは，P1 および P2 の CPU 能力の制約を考慮して設計されたものである．

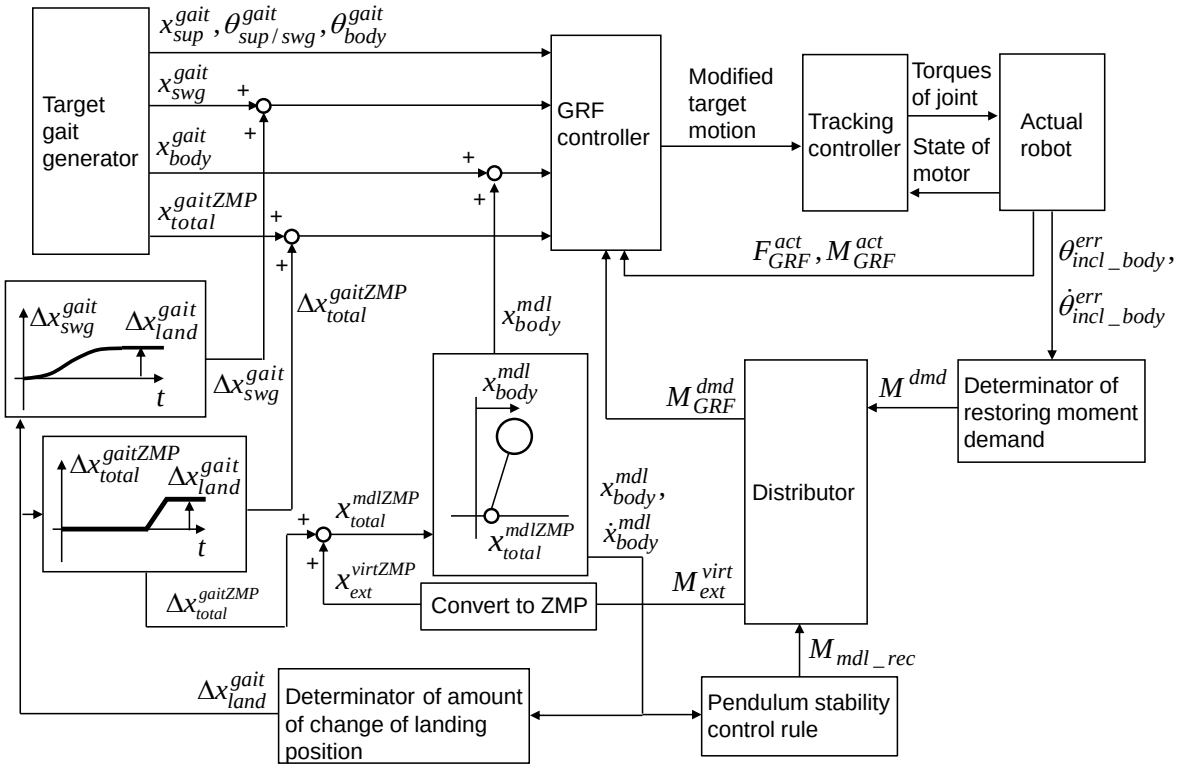


Fig.9.5 Simplified macro-stabilization control system

以下に，本節で使用する表記を列挙する．

x_{body}^{gait} ： 基本の目標歩容の上体位置
θ_{body}^{gait} ： 基本の目標歩容の上体姿勢
$x_{sup/swg}^{gait}$ ： 基本の目標歩容の支持脚/遊脚位置軌道
$\theta_{sup/swg}^{gait}$ ： 基本の目標歩容の支持脚/遊脚姿勢軌道
$x_{total}^{gaitZMP}$ ： 基本の目標歩容の ZMP 軌道
$\theta_{incl_body}^{err}$ ： 上体傾き偏差
M^{dmd} ： 復元力モーメント要求値
M_{GRF}^{dmd} ： 床反力制御用復元力モーメント要求値
M_{ext}^{virt} ： 仮想外力モーメント
$x_{ext}^{virtZMP}$ ： 仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}の ZMP 換算値
M_{mdl_rec} ： モデル復元要求モーメント
x_{body}^{mdl} ： 倒立振子モデルの質点位置
x_{total}^{mdlZMP} ： 倒立振子モデルの支点位置（倒立振子モデル ZMP）
Δx_{land}^{gait} ： 今回歩容着地位置修正量
$\Delta x_{land_prev}^{gait}$ ： 前回歩容着地位置修正量
Δx_{swg}^{gait} ： 遊脚軌道の修正量
$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$ ： ZMP 軌道修正量
$M_{mdl_rec}^{unltd}$ ： 無制限モデル復元要求モーメント
λ_{mdl} ： 倒立振子モデルの正の固有値
$q_{\Delta ZMP}$ ： 現在以降の$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$軌道が発散成分に及ぼす影響を現在の発散成分に等価変換したもの
K_{mdl_rec} ： 倒立振子安定化制御ゲイン
$\left[M_{mdl_rec}^{min}, M_{mdl_rec}^{max}\right]$：モデル復元要求モーメント許容範囲
$\mathrm{q}\left(\Delta x_{land}^{gait}\right)$ ： 次回歩容座標系から見て，現在時刻の次の時刻からの次回歩容終端までの ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$が発散成分に及ぼす影響を，現在時刻の次の時刻の発散成分に等価変換したもの

Fig.9.5 の倒立振子モデルは,上体の摂動運動と目標 ZMP の摂動との関係を表す摂動動力学モデルである．この倒立振子モデルは，3 質点モデルの倒立振子とは異なり，ロボット全体を単純な 1 質点の倒立振子で表したものであり，倒立振子の質量はロボット全質量とする．

モデル ZMP 制御のための上体運動の修正は，歩容生成部（Gait generator）が生成する基本の目標歩容の上体位置x_{body}^{gait}に，倒立振子モデルの質点位置x_{body}^{mdl}を加えることで行われる．

以下では，Fig.9.5 のデータの流れに沿って，簡易型大局的姿勢安定化制御システムを説明する．

STEP1）復元力モーメント要求値決定部(Determinator of restoring moment demand)におい

て，上体傾き偏差$\theta_{incl_body}^{err}$とその変化率$\dot{\theta}_{incl_body}^{err}$を基に，復元力モーメント要求値$M^{dmd}$を決定する．

STEP2）倒立振子安定化制御則（Pendulum stability control rule）によって，倒立振子モデルを直立状態に戻す（より厳密には，着地修正量決定部が算出する今回歩容着地位置修正量を 0 に近づける）ために望ましい仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}の値であるモデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}を決定する．（詳細を後述する．）

STEP3）分配器（Distributor）において，復元力モーメント要求値M^{dmd}とモデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}を基に，床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}と仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}を決定する．（詳細を後述する．）

STEP4）前回歩容着地位置修正量$\Delta x_{land_prev}^{gait}$（前回歩容時に最終的に決定された着地位置修正量）に応じて，ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$の軌道を決定する．Fig.9.6 に示すように，ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$は，今回歩容では，両脚支持期の間に前回歩容着地位置修正量$\Delta x_{land_prev}^{gait}$分だけ等速度で移動して，今回歩容の座標系の原点で停止する．次回歩容では，両脚支持期の間に今回歩容着地位置修正量Δx_{land}^{gait}（着地修正量決定部が決定した最新の着地位置修正量）分だけ等速度で移動して，次回歩容の座標系の原点で停止する．

STEP5）仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}の ZMP 換算値$x_{ext}^{virtZMP}$と ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$との和を，倒立振子モデルに，その支点位置$x_{total}^{mdlZMP}$として入力して，出力として倒立振子モデルの質点位置x_{body}^{mdl}を得る．

STEP6）着地修正量決定部（Determinator of amount of change of landing position）において，今回歩容着地位置修正量Δx_{land}^{gait}を決定する．Δx_{land}^{gait}は，STEP5 で求めた倒立振子モデルの状態$x_{body}^{mdl}, \dot{x}_{body}^{mdl}$を基に，仮想外力モーメント$M_{ext}^{virt}$が 0 であり続けると仮定したときに，倒立振子モデルが直立状態に収束するように決定される．（詳細を後述する．）

STEP7）今回歩容着地位置修正量Δx_{land}^{gait}に応じて，遊脚軌道の修正量Δx_{swg}^{gait}の軌道を決定する．遊脚軌道の修正量Δx_{swg}^{gait}は，遊脚が着地するまでにΔx_{land}^{gait}分だけ移動する．

STEP8）基本の目標歩容の上体位置x_{body}^{gait}に，倒立振子モデルの質点位置x_{body}^{mdl}を加えることによって，目標歩容の上体位置を修正する．

STEP9）基本の目標歩容の遊脚軌道x_{swg}^{gait}に，遊脚軌道の修正量Δx_{swg}^{gait}を加えることによって，目標遊脚軌道を修正する．

STEP10）基本の目標歩容の ZMP 軌道$x_{total}^{gaitZMP}$に，ZMP 軌道修正量 $\Delta x_{total}^{gaitZMP}$ を加えることによって，目標 ZMP 軌道を修正する．

STEP11）基本の目標歩容の上体姿勢θ_{body}^{gait}，支持脚足部位置・姿勢角$x_{sup}^{gait}, \theta_{sup}^{gait}$，遊脚足部位置・姿勢角$x_{swg}^{gait}, \theta_{swg}^{gait}$と共に，修正された目標歩容の上体位置，遊脚足部位置および ZMP を，床反力制御部（複合コンプライアンス制御部）に入力する．床反力制御部では，目標 ZMP まわりの実床反力モーメントが床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}に一致するように，支持脚/遊脚足部位置・姿勢をさらに修正し，逆キネマティクス演算によって目標関節角を求める．

STEP12）追従制御部において，実際のロボットの関節角が目標関節角軌道に追従するように，アクチュエータを制御する．

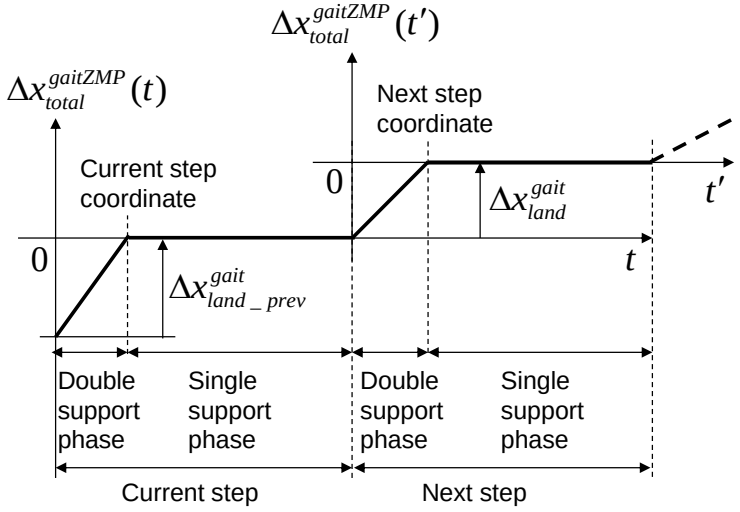


Fig.9.6 Amount of modification of ZMP

上記のように，着地位置修正量に応じた ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$によって目標 ZMP 軌道が修正されると共に，$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$に応じて目標運動が修正されるので，$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$に起因する総慣性力変化分と床反力変化分は相殺し合う．したがって，$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$は，上体傾き偏差に対して影響を及ぼさない．すなわち，本システムでは，着地位置修正には，上体傾き偏差を直接的に制御する作用はない．着地位置修正は，目標運動の発散（倒立振子モデルの発散）を防ぐために行われる．

なお，本システム（Fig.9.5 のシステム）でも，各変数は，基本的には支持脚座標系によって表され，支持脚が切り替わるたびに，以下のように座標変換が行われる．

基本の目標歩容の変数は，着地位置修正量Δx_{land}^{gait}にかかわらず，基本の次回目標歩容の支持脚座標系に変換される．

ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$の折れ線は,Fig.9.6 の今回歩容座標系(Current step coordinate)から次回歩容座標系（Next step coordinate）に座標変換される．倒立振子モデルの質点位置x_{body}^{mdl}も，今回歩容座標系から次回歩容座標系に変換される．（倒立振子モデルの質点位置x_{body}^{mdl}は，Δx_{land}^{gait}だけ減じられる.）

以下では，STEP2 の倒立振子安定化制御則の詳細を述べる．

まず次式により，無制限モデル復元要求モーメント$M_{mdl_rec}^{unltd}$を決定する．

$$M_{mdl_rec}^{unltd} = -K_{mdl_rec}\left(x_{body}^{mdl} + \dot{x}_{body}^{mdl}/\lambda_{mdl} + q_{\Delta ZMP}\right) \tag{9.4}$$

上式において，λ_{mdl}は，倒立振子モデルの正の固有値であり，$x_{body}^{mdl} + \dot{x}_{body}^{mdl}/\lambda_{mdl}$は，発散

成分である．$q_{\Delta ZMP}$は，現在時刻以降（現在時刻を含む）の$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$軌道が発散成分に及ぼす影響を，現在の発散成分に等価変換したものであり，4.3.3 節に示す方法によって求められる．ただし，今回歩容の着地位置修正量Δx_{land}^{gait}が 0 であるものとして求める．（現在が両脚支持期であるならば，両脚支持期の終端まで前回歩容着地位置修正量$\Delta x_{land_prev}^{gait}$に応じた$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$が発生するので，この分の影響だけを求めればよい．現在が両脚支持期を過ぎているならば，$q_{\Delta ZMP}$は 0 となる．）K_{mdl_rec}は，倒立振子安定化制御ゲインである．

すなわち，倒立振子モデルの発散成分が 0 に近づくように，無制限モデル復元要求モーメント$M_{mdl_rec}^{unltd}$が決定される．（倒立振子モデルの発散成分が 0 になると，着地修正量決定部が決定する着地位置修正量Δx_{land}^{gait}は 0 になる．したがって，さらに言い換えると、着地位置修正量Δx_{land}^{gait}が 0 になるように，無制限モデル復元要求モーメント$M_{mdl_rec}^{unltd}$が決定される．）

なお，仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}を，上式で求められる$M_{mdl_rec}^{unltd}$に一致させても，倒立振子モデルの発散成分は有限時間内には 0 にならないので，永遠に着地位置を修正し続けなければならなくなる．そこで，歩行を停止したい場合には，上式で求められる$M_{mdl_rec}^{unltd}$が微小量になったら，上式に従わず，有限時間で（例えば 1 制御周期で）発散成分が 0 になるように，$M_{mdl_rec}^{unltd}$を決定する．

次いで，モデル復元要求モーメント許容範囲$\left[M_{mdl_rec}^{min}, M_{mdl_rec}^{max}\right]$を決定する．モデル復元要求モーメントが大き過ぎると，モデル復元要求モーメントに応じて修正された着地位置に，ロボットの能力を越えずに滑らかに到達するように遊脚軌道を修正することが困難になる．そこで，モデル復元要求モーメントに上記のような許容範囲を設けることとする．例えば，許容範囲の上下限値は，遊脚が着地するまでの残り時間の二乗に比例するように決定すればよい．さらには，遊脚が伸び切らない範囲に決定すればよい．

最後に，$M_{mdl_rec}^{unltd}$を許容範囲$\left[M_{mdl_rec}^{min}, M_{mdl_rec}^{max}\right]$に制限することで，モデル復元要求モーメント$M_{mdl_rec}$を得る．

以下では，STEP6 の着地修正量決定部について詳細を説明する．

着地修正量決定部では，仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}が 0 であり続けると仮定したときに，倒立振子モデルが次回歩容座標系の原点で直立状態に収束するように，今回歩容着地位置修正量Δx_{land}^{gait}を決定する．

具体的には，次式を満足するように決定する．

$$\left(x_{body}^{mdl} + \dot{x}_{body}^{mdl} / \lambda_{mdl} - \Delta x_{land}^{gait}\right) + q\left(\Delta x_{land}^{gait}\right) = 0 \qquad (9.5)$$

上式において，最初のカッコ内は，STEP5 で求めた倒立振子モデルの最新状態を，次回歩容座標系（Fig.9.6）に変換したものである．$\mathrm{q}\left(\Delta x_{land}^{gait}\right)$は，次回歩容座標系から見て，現在時刻の次の時刻からの次回歩容終端までの ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$が発散成分に及ぼす影響を，現在時刻の次の時刻の発散成分に等価変換したものであり，4.3.3 節に示す方法によって求められる．（式(9.4)の$q_{\Delta ZMP}$を求める場合と比べ，初期時刻が 1 制御周期分だけ進んでいるこ

とに注意.）

Fig.9.7 に，STEP3 の分配器の具体的構成例を示す.

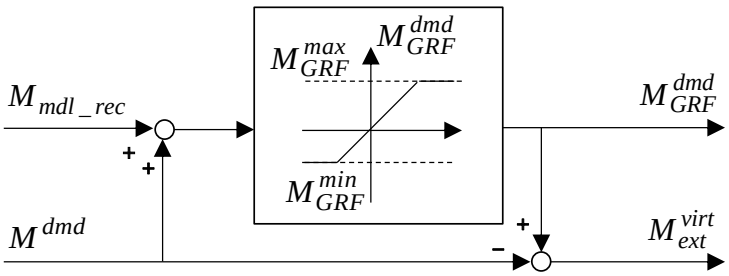


Fig.9.7 distributor

本分配器は，以下の条件 1，2 を満足しつつ，極力，条件 3 も満足するように，床反力制御用復元力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}と仮想外力モーメントM^{virt}_{ext}を決定する.

条件 1）式(9.3)を満足する．（上体傾き偏差を適切に 0 に収束させる.）
条件 2）床反力制御用復元力モーメント要求値M^{dmd}_{GRF}が所定の許容範囲$[M^{min}_{GRF}, M^{max}_{GRF}]$を越えない.
条件 3）仮想外力モーメントM^{virt}_{ext}とモデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}との差の絶対値を最小にする.（仮想外力モーメントM^{virt}_{ext}を，極力，モデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}に一致させることで，修正された目標歩容を元の目標歩容に適切に収束させる.）

すなわち，Fig.9.7 に示すように，M^{dmd}_{GRF}とM^{virt}_{ext}を決定する．以上の分配によって，倒立振子モデルを 0 に収束させることよりも，上体傾き偏差を 0 に収束させることが優先される.

なお，実床反力モーメントを物理限界まで発生させると，足底の接地面積が減少し過ぎてスピンし易くなるので，$[M^{min}_{GRF}, M^{max}_{GRF}]$は，スピンを防ぐために，物理限界より小さめに設定する.

分配器の動作を模式的に表した例を Fig.9.8 に示す．仮想外力モーメントM^{virt}_{ext}は，常に$(M^{dmd}_{GRF} - M^{dmd})$と決定される．なお，遊脚が着地して新たな支持脚となっても（期間⑥以降も），座標系を切り替えずに表示する.

期間①：M_{mdl_rec}が 0（すなわち，倒立振子モデルの発散成分が 0）であり，かつ，$(M^{dmd} + M_{mdl_rec})$が許容範囲$[M^{min}_{GRF}, M^{max}_{GRF}]$にあるため，$M^{dmd}_{GRF}$は$M^{dmd}$に決定される.
期間②：上体傾き偏差が増加することによりM^{dmd}が増加し，$(M^{dmd} + M_{mdl_rec})$が上限許容値M^{max}_{GRF}を越えると，M^{dmd}_{GRF}は上限許容値M^{max}_{GRF}に決定される．仮想外力モーメントM^{virt}_{ext}は負の値に決定されるので，倒立振子の発散成分が負の方向に増加し，M_{mdl_rec}が 0 から正に増加する.
期間③④：上体傾き偏差が減少してM^{dmd}が上限許容値M^{max}_{GRF}を下回り始めると，M^{dmd}_{GRF}は上限

許容値M_{GRF}^{max}に決定される．また，M_{ext}^{virt}は正の値に決定され，倒立振子の発散が抑制される．
期間⑤: $\left(M^{dmd}+M_{mdl_rec}\right)$が上限許容値$M_{GRF}^{max}$を下回り始めると，$M_{GRF}^{dmd}$は$\left(M^{dmd}+M_{mdl_rec}\right)$に，$M_{ext}^{virt}$は$M_{mdl_rec}$に決定される．
期間⑥⑦：着地位置修正量に応じた ZMP 軌道修正量$\Delta x_{\square otal}^{gaitZMP}$によって倒立振子が着地位置修正量だけ進んだ点に収束する．新たな支持脚座標系から見ると発散成分が 0 になるのでM_{mdl_rec}が 0 になり，M_{GRF}^{dmd}はM^{dmd}に，M_{ext}^{virt}は 0 に決定される．

全期間のうち，期間④⑤では，無制限モデル復元要求モーメント$M_{mdl_rec}^{unltd}$が許容範囲$\left[M_{mdl_rec}^{min},M_{mdl_rec}^{max}\right]$を越えるため，$M_{mdl_rec}$が許容範囲内に制限される．

なお，着地位置修正量が発生しても（0 でなくなっても），それに応じた ZMP 軌道修正量$\Delta x_{total}^{gaitZMP}$は，着地まで（片脚支持期の終端まで）0 である．遊脚軌道は，着地位置修正量が変更されるたびにその瞬間から，変更された着地位置に向かう軌道に滑らかに修正される．

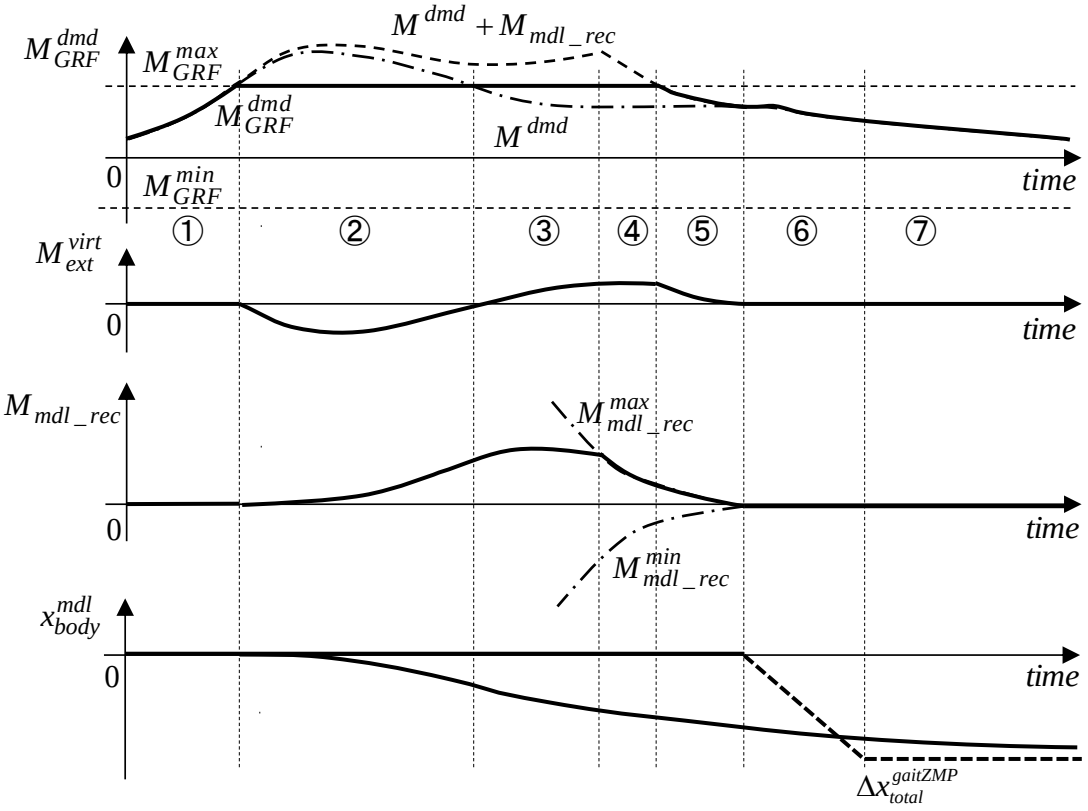


Fig.9.8 Output of distributor when error of inclination of body is large

Fig.9.9 は，Fig.9.8 の例に比べて上体傾き偏差の復元が早かったために，着地位置修正量が最終的に 0 になった場合を示す．図示はしていないが，遊脚軌道は，着地位置修正量が変更されるたびに修正されるが，最終的に，変更前の着地位置に着地する．

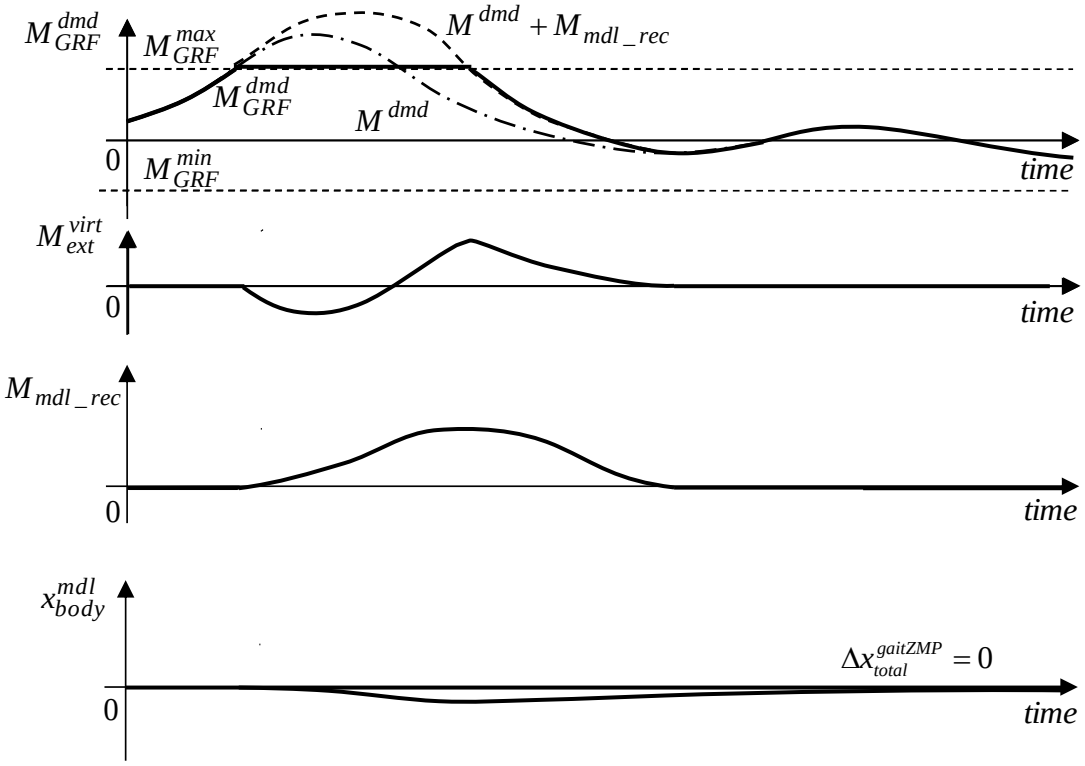


Fig.9.9 Output of distributor when error of inclination of body is small

Fig. 9. 10 に，本システムを導入した P2 に，後ろ向きの外力を加える実験の様子を示す．

押され初めは，②のように，かかとを床に押し付けて踏ん張るが，上体傾き偏差が大きくなって，復元力モーメント要求値が許容範囲を越えると，仮想外力が発生し，基本の目標歩容として，その場足踏みを開始する．ただし，仮想外力を入力された倒立振子モデルの状態に応じて，着地修正量決定部によって，着地位置が修正される（③～⑭）．

押されなくなって上体傾き偏差が小さくなり，仮想外力がなくなると，停止する．

なお, 復元力モーメント要求値M^{dmd}が発散成分を基に決定されるならば, 前述したように, フィードバックゲインが高くなっても不安定になりにくいので，一旦，上記のように仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}まで求めた後，上体傾き偏差をより速く 0 に収束させるように，床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}を，上記許容範囲を少々越えて，モデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}と復元力モーメント要求値M^{dmd}の和に近い値に変更してもよい．

また，同じ理由から，仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}は，本章で述べた方法で求めた値をさらに k 倍（ただし，$k > 1$）した値にしてもよい．これにより，上体傾き偏差がさらに低減される．

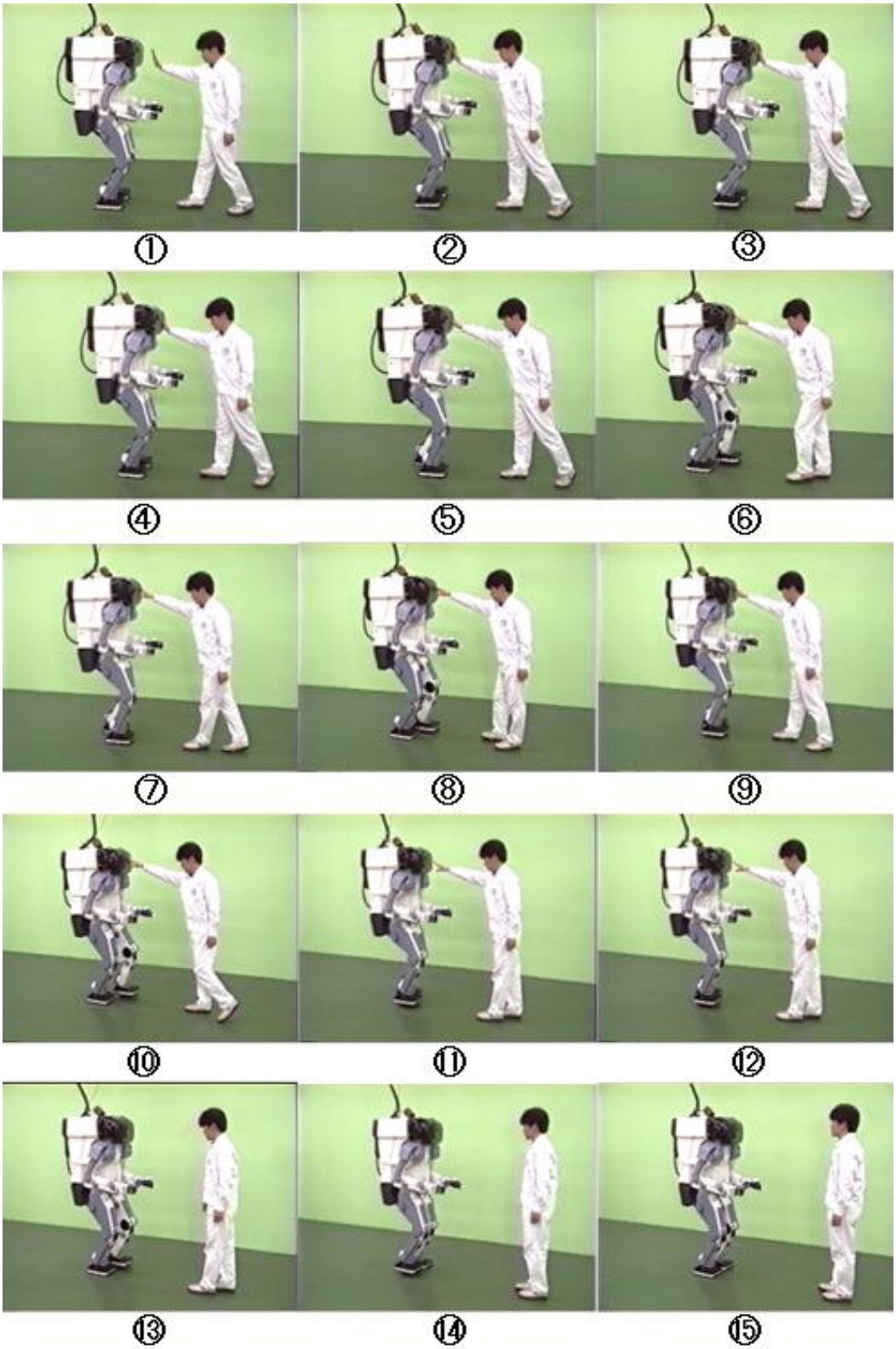


Fig.9.10 Reaction when pushed back

9.5 発展型大局的姿勢安定化制御システム

Fig.9.11 に，ASIMO で開発を進めている，発展型大局的姿勢安定化制御システム（以降，発展型システムと略す）を示す．簡易型大局的姿勢安定化制御システム（以降，簡易型システムと略す）では，モデル ZMP 制御によって崩された目標歩容を元の目標歩容に収束させていたが，発展型システムでは，崩された目標歩容を起点に，所定の目的に応じて新たな適切なシナリオ（歩容列）を探索によって決定する．演算負荷が高いので，現研究段階では，シナリオの選択肢の数は，数個程度に限定される．

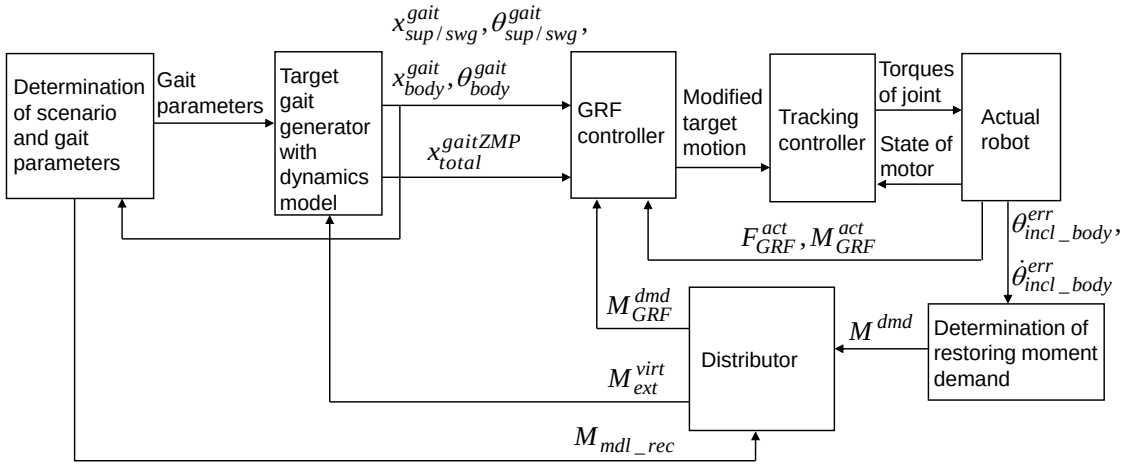


Fig.9.11 Advanced macro-stabilization control system

本システムでは，簡易型システムと比較して，着地位置修正量決定部が，シナリオ・歩容パラメータ決定部（determination of scenario and gait parameter）に置き換えられる．基準歩容を生成する歩容生成部と倒立振子モデル（摂動動力学モデル）は，動力学モデルを用いて自在な歩容を生成する歩容生成部（Target gait generator with dynamics model）に置き換えられる．本章のシナリオ・歩容パラメータ決定部は，Fig.1.1 のシナリオ作成部と歩容パラメータ決定部に対応する．本章の歩容生成部は，Fig.1.1 の単純モデル歩容生成部と幾何学的写像部とフルモデル補正部に対応する．すべての処理は，制御周期毎に実行されるものとする．

長期シナリオとは，“所定の目的を達成するための，目標歩容の最新状態（歩容生成部の最新状態）を初期状態とした所定期間の歩容列”のことである．長期シナリオは，初期状態と歩容列（今回歩容，次回歩容，．．．）の歩容パラメータによって表される．

長期シナリオにおいては，目標 ZMP まわりの総慣性力モーメントの水平成分が 0 になるように運動が生成される．（仮想外力は考えない．）

所定の目的の例としては，「3 歩後に，元の経路上で元の速度ベクトルで移動している状態に戻ること」，「なるべく少ない歩数で，元の歩幅，元の歩行周期で移動している状態に戻ること」などが考えられる．

シナリオ・歩容パラメータ決定部は，具体的には，所定の制約条件を満足した上で，歩行，走行，ジャンプなどのいくつかの歩容列候補を生成し，所定の評価値が最大となる歩容列を長期シナリオとして決定する．なお，歩容列の生成には，第４章（自在歩行歩容生成）または第５章（自在走行歩容生成）で述べた手法を用いればよい．

シナリオ・歩容パラメータ決定部は，次いで，歩容生成部に対して，長期シナリオの中の今回歩容パラメータ（目標 ZMP 軌道，足部位置・姿勢角軌道など）を歩容生成部に出力する．

歩容生成部は，上記今回歩容パラメータを基に，目標 ZMP のまわりの総慣性力モーメント水平成分が仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}に一致するように目標歩容を生成する．これには，第４章の単純モデル歩行歩容生成手法または第５章の単純モデル走行歩容生成手法を用いて近似歩容を生成してから，第７章の幾何学的写像とフルモデル補正によって歩容を補正すればよい．ただし，目標 ZMP のまわりの床反力モーメント（総慣性力モーメント）水平成分が仮想外力モーメントM_{ext}^{virt}となるように，近似歩容生成とフルモデル補正を行うものとする．

簡易型システムにおいては，着地位置修正量を 0 に近づけるように，モデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}を決定した．これに対し，発展型システムのシナリオ・歩容パラメータ決定部では，決定した長期シナリオの歩容列の中の所定の歩容パラメータ（例えば，今回歩容の歩幅）を，所定の目的を達成する上で，より適した値（元の値が最適とは限らない）に修正するためのモデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}を求め，分配器に入力する．もし，分配器から歩容生成部の動力学モデルに，上記のように決定したM_{mdl_rec}が仮想外力として入力されて，目標歩容の動力学モデルの状態が修正されると，次の制御周期に改めて長期シナリオを決定する際に，上記所定の歩容パラメータをより適した値に修正した長期シナリオを作ることが可能になる．

なお，分配器の構成は，簡易型システムの場合と同じく，Fig.9.7 のようにすればよい．

床反力制御部（複合コンプライアンス制御部）には，歩容生成部から目標歩容（目標 ZMP を含む目標床反力と目標運動）の今回状態が入力され，分配器から床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}が入力される．床反力制御部は，目標 ZMP まわりに作用する実床反力モーメントが M_{GRF}^{dmd}に一致するように，目標運動の足部位置・姿勢を修正し，これを基に各関節角の目標値を求め，関節角追従制御部に出力する．

9.6 水平床反力の許容範囲を考慮したモデル ZMP 制御

ここまでの議論では，上体水平並進加速度が発生するように仮想外力を作用させたが，この方法では，走行のように水平床反力（摩擦力）に制限がある歩容には対応できない．本節では，このような歩容に対応できる大局的姿勢安定化制御システムの例として，Fig.9.12 に示すシステムを提案する．Fig.9.12 は，本システムの分配器と歩容生成部を表すが，これ以外の部分は，Fig.9.11 の制御システムと同じでよい．

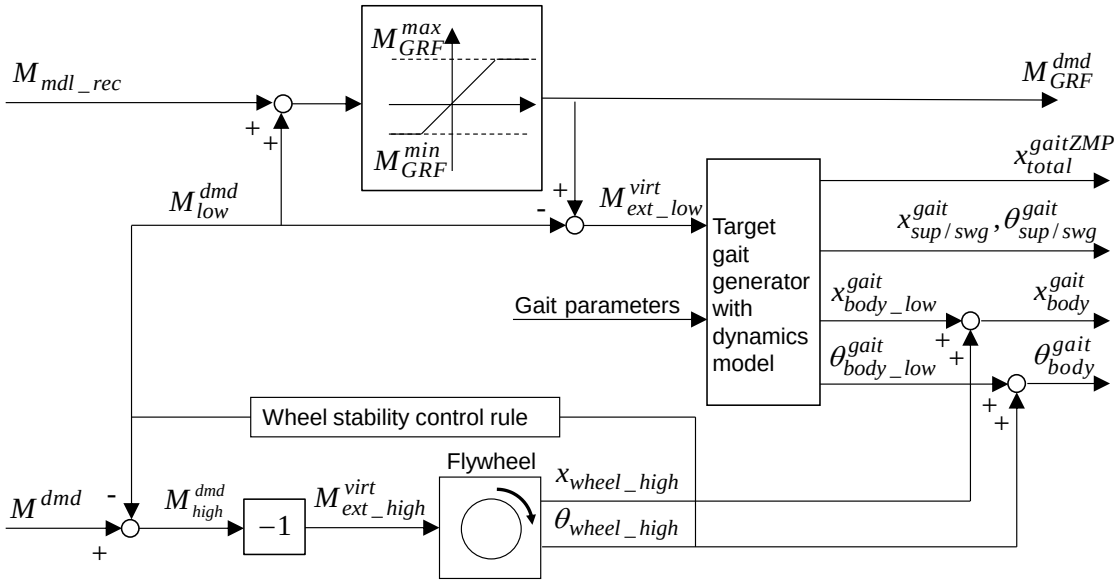


Fig.9.12 Advanced distributor

以下に，本節で新たに使用する表記を列挙する．

θ_{wheel_high}：　高周波数成分用フライホイール角
x_{wheel_high}：　高周波数成分用フライホイール角に伴う上体水平位置補正量
$M_{ext_low}^{virt}$：　仮想外力モーメント低周波成分
$M_{ext_high}^{virt}$：　仮想外力モーメント高周波数成分
M_{high}^{dmd}：　復元力モーメント要求値高周波数成分
M_{low}^{dmd}：　復元力モーメント要求値低周波数成分
$x_{body_low}^{gait}$：　目標歩容上体位置低周波数成分
$\theta_{body_low}^{gait}$：　目標歩容上体姿勢角低周波数成分

本システム内に，Fig. 9. 12 に示すように，高周波数成分用フライホイール（6.5 節の補正用フライホイールモデルと同様のモデル．以降，フライホイールと略す）とフライホイールの安定化制御則とから成るフィードバックシステムを構成し，フライホイール角（θ_{wheel_high}と表記する）が 0 に収束するように制御されるものとする．ただし，フライホイールの入力の直前に，反転器（(-1)倍のゲイン）を備えるものとする．

まず，このフィードバックシステムに，復元力モーメント要求値M^{dmd}を入力する．安定化制御則の出力は，M^{dmd}の低周波数成分となり，減算器出力は，M^{dmd}の高周波数成分になる．そうでなければ，フライホイールの加速度の平均値が 0 にならなくなり，フライホイールは発散することから，明らかである．そこで以降，安定化制御則の出力を，復元力モーメント要求値低周波数成分M_{low}^{dmd}，減算器出力を，復元力モーメント要求値高周波数成分M_{high}^{dmd}と呼ぶ．また，反転器出力は，復元力モーメント要求値高周波数成分を反転したものであること

から，仮想外力モーメント高周波数成分$M_{ext_high}^{virt}$と呼ぶ．フライホイールの運動は，仮想外力モーメント高周波数成分$M_{ext_high}^{virt}$に応じた上体回転運動（全体重心位置を変えずに上体を傾ける運動）を意味するので，フライホイール角をθ_{wheel_high}，フライホイール角に伴う上体水平位置補正量をx_{wheel_high}と表記する．

次いで，M_{low}^{dmd}とモデル復元要求モーメントM_{mdl_rec}を基に，Fig.9.7 の分配器と同様に，床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}と仮想外力モーメント低周波成分$M_{ext_low}^{virt}$を決定する．

次いで，$M_{ext_low}^{virt}$と歩容パラメータを歩容生成部に入力し，目標 ZMP のまわりの床反力モーメント(すなわち,総慣性力モーメントの(-1)倍)の水平成分が仮想外力モーメント$M_{ext_low}^{virt}$に一致し，かつ設定された水平床反力の許容範囲を満足するように，目標歩容の上体位置$x_{body_low}^{gait}$と上体姿勢角$\theta_{body_low}^{gait}$を決定する．目標歩容の生成には，第５章の自在走行歩容生成手法と第６章のフルモデル補正手法を応用すればよい．

最後に，$x_{body_low}^{gait}$，$\theta_{body_low}^{gait}$それぞれに，x_{wheel_high}，θ_{wheel_high}を加えることによって，最終的な目標歩容の上体位置x_{body}^{gait}，上体姿勢角θ_{body}^{gait}を決定する．

上記のごとく，水平床反力の許容範囲を満足するように，目標歩容の上体位置$x_{body_low}^{gait}$と上体姿勢角$\theta_{body_low}^{gait}$が決定されるので，スリップが生じにくくなる．また，復元力モーメント要求値M^{dmd}の高周波数成分を高周波数成分用フライホイールモデルに負担させることで，上体傾き偏差の安定化制御に遅れを生じさせることなく，床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}の高周波数成分を低減することができる．この結果，接地性が高くなり，スピンが生じにくくなる．また，M^{dmd}の高周波数ノイズが分配器のリミッターを超えて仮想外力として流出してしまうことが抑制されるので，不必要な長期シナリオ変更が生じにくくなる．

なお，復元力モーメント要求値M^{dmd}の高周波成分が小さい場合には，高周波数成分用フライホイールモデルを省き，M^{dmd}を直接，分配器に入力してもよい．

また逆に，M^{dmd}の高周波成分が大きい場合には，分配器を省き，仮想外力モーメント低周波成分$M_{ext_low}^{virt}$を 0，床反力制御用復元力モーメント要求値M_{GRF}^{dmd}をM_{low}^{dmd}にするだけでも，上体傾き偏差が大幅に低減される．(ASIMO 実験機による走行では，数分の 1 に低減されることが確認されている.)

9.7 まとめ

本章では，床反力制御（複合コンプライアンス制御）、モデル ZMP 制御および長期シナリオ修正制御の 3 つのコア技術から成る大局的姿勢安定化制御を提案した．

大局的姿勢安定化制御は，複合コンプライアンス制御によって，片脚支持期，両脚支持期いずれにおいても，上体位置・姿勢偏差の挙動が，目標 ZMP を支点とする倒立振子の挙動になるように制御されていることを前提とする制御である．(この前提により，上体傾き偏差は，単なる上体部分の傾きではなく，ロボット全体の傾きを代表することに留意.)

床反力制御（複合コンプライアンス制御）は，目標まわりに実床反力モーメントを発生さ

せて，実上体傾きを目標上体傾きに近づける制御である．(前章参照)

モデル ZMP 制御は，上体傾き偏差を低減するために，目標歩容を生成する動力学モデルに仮想外力を加える制御であり，仮想外力が目標 ZMP まわりに作用するモーメントの（-1）倍の復元力（厳密には，上体傾き偏差を 0 に収束させる復元力）が発生する．目標歩容側が実ロボットに歩み寄ることで，上体傾き偏差を低減する制御とも言える．(ただし，単に直接的に目標上体傾きを実上体傾きに近づけるように修正する制御ではない.)

長期シナリオ修正制御は，モデル ZMP 制御によって崩された目標歩容の現在時刻状態を初期状態として，所定の目的が達成されるように長期シナリオ（目標歩容列）を修正する制御である．

分配器が，上体傾き偏差を 0 に収束するための復元力モーメント要求値を，床反力制御用復元力モーメント要求値と仮想外力モーメントに分配することで，上体傾き偏差を 0 に収束する作用が，常に定量的に保証される．(式(9.2)または式(9.2´)参照)

分配器による分配次第で，大局的姿勢安定化制御に，頑なに目標歩容通りに運動するような性格を持たせることも，実ロボットの状態に応じて実ロボットに無理をさせないように目標運動を修正する柔軟性を持たせることも可能である．

ヒューマノイドロボット P1 および P2 に導入した簡易型システムでは，仮想外力によって目標歩容の上体水平加速度が修正される．修正された目標歩容が元の目標歩容に戻るように，着地位置だけが修正される．

発展型システムでは，崩された目標歩容を起点に，所定の目的に応じて新たな適切なシナリオ（歩容列）を探索によって決定する．

モデル ZMP 制御において，目標歩容の上体水平加速度と上体回転運動の角加速度を修正するようにして，水平床反力許容範囲を満足するように両加速度の割り合いを調整すれば，上体傾き偏差が低減されると共に，スリップやスピンが抑制される．

最後に，モデル ZMP 制御の意義に関して補足する．

モデル ZMP 制御には，上体傾き偏差を 0 に収束させる効果はあるが，必ずしも全体重心を回復させる効果があるとは限らない．例えば，上体傾き偏差を 0 に収束させるように，仮想外力によって上体を水平に加速させると，全体重心位置は，むしろ元の目標歩容の全体重心位置から離れてしまう．また，上体をグローバル座標系上で所定の傾き(例えば鉛直)に収束させる効果があるとも限らない．例えば，上体傾き偏差を 0 に収束させるように，仮想外力によって上体回転運動（全体重心を変えずに，上体を傾ける動作）を発生させると，実上体傾きは，むしろ元の目標歩容の上体傾きから離れてしまう．

モデル ZMP 制御の第 1 の意義は，あくまで，上体傾き偏差を 0 に収束させる効果が常に保証されるので，目標歩容を長期的に破綻しないように生成しさえすれば，実ロボットの継続的な安定性が保証されるということである．

第 2 の意義は，グローバル座標系から見て，実際の足部軌道も目標軌道に追従するように

なるので，歩行時だけでなく走行時でも，遊脚の着地タイミングの乱れが減り，着地衝撃が小さくなることである．

第 3 の意義は，長期シナリオの修正量の変動が小さくなることである．

比較対象として，モデル ZMP 制御を導入せず，実上体傾きを初期状態として長期シナリオを修正する場合を考える．この場合，長期シナリオの初期状態に，上体傾斜計検出値に含まれるノイズや高次振動成分がそのまま乗畳することになる．したがって，長期シナリオの修正量（今回修正したシナリオと前回に修正したシナリオとの差）が，高い振動数で変動する．また，次の制御周期までに（例えば 5[ms]後までに）発生する上体傾き偏差は，まだ経過時間が短いために，非常に小さい．したがって，上体傾き偏差の信号成分は，ノイズや高次振動成分に埋もれてしまい，床反力制御による姿勢安定化を図ろうとしても，上体傾き偏差フィードバックゲインが高くできず，実上体傾きを目標上体傾きに収束させる復元力をほとんど発生できなくなる．すなわち，実ロボットの挙動は，踏ん張り力が発生できない竹馬のようにふらつく．この結果，長期シナリオ全体の修正量も大きく変動するようになり，いわゆる千鳥足になる恐れが発生する．

これに対し，モデルZMP制御によって崩された動力学モデル状態を長期シナリオの初期状態とする場合は，次のようになる．

すなわち，上体傾斜計検出値と目標歩容の上体傾きから得られる上体傾き偏差を基に，復元力モーメント要求値を求め，さらにこれを基に分配器によって決定される仮想外力には，上体傾斜計検出値のノイズや高次振動成分が含まれるが，動力学モデルが積分系であるので，仮想外力を入力された動力学モデル状態では，ノイズや高次振動成分の影響が低減される．したがって，この状態を初期状態として長期シナリオを修正することで，ノイズや高次振動成分に起因する長期シナリオの修正量の変動が抑制される．さらに，むしろこの方が重要であるが，分配器によって，許容範囲内で可能な限り適切に，実上体傾きが目標上体傾きに収束するように，実ロボットの床反力モーメントM_{GRF}^{dmd}が決定されるので，実ロボットのふらつきに起因する長期シナリオの修正量の変動も低減される．

第１０章. 結論

第１０章. 結論

10.1 本論文による成果

本論文では，2 脚ロボットに，歩行，走行など多様な形態で自在に移動する能力を与え，かつ，この能力を活かした多様な姿勢復元動作によって，踏ん張りだけでは得られない高いバランス能力を獲得させるために，

1）歩行と走行を統一的に扱うことができるリアルタイム自在歩容生成部と，
2）路面の凹凸を吸収しつつ，大きく傾いて踏ん張りきれなくなると，目標運動を崩して高い復元力を発生させる大局的姿勢安定化制御部

とから成る制御システムを提案した．前者に対しては，シミュレーションおよび実際のロボットの実験により有効性を示し，後者に対しては，理論的効果を示した．

以下に，提案した主な手法・技術を列挙する．

【リアルタイム自在歩容生成に関して】

歩容生成部は，

a）単純モデルを用いて継続性を保証した近似歩容を生成するための近似歩容生成部
b）フルモデルを用いて近似歩容を補正するフルモデル補正部

から成るものとする（1.3 節）．また，近似歩容生成部は，

a1）歩容パラメータ決定部
a2）単純モデル歩容生成部
a3）単純モデル歩容に瞬間値を基に，幾何学的に近似歩容の瞬間値（写像用モデルの姿勢）を決定する幾何学的写像部

から成るものとする（4.2 節）（5.2 節）（6.2 節）．

本論文では，自在歩容生成に関して，以下の手法・技術を提案した．

1）3 質点とフライホイールから構成される単純モデル（4.3.1 節）（5.3 節）

単純モデルは，全体重心の鉛直運動，上体の水平運動，および上体回転運動を，それぞれに対応する動力学モデルで表す．

全体重心の鉛直運動を表すモデルは，全体重心の鉛直運動と鉛直床反力の関係を表す 1 質点のモデルである．全体重心の鉛直運動は，上体の水平運動および上体回転運動よりも先に決定される．

上体の水平運動を表すモデルは，上体の水平運動と足部の水平・鉛直運動と床反力の

関係を表し，上体の水平運動に相当する倒立振子と両足部質点の計 3 質点から成るモデル（3 質点モデル）である．走行のように鉛直床反力が大きく変動する歩容も生成する場合には，「鉛直方向の加速度変化を伴う倒立振子」を用いる．歩行歩容だけを生成するならば，上記倒立振子として「鉛直加速度が 0 の線形倒立振子」を用いてもよい．いずれにしても，常微分方程式で表される線形倒立振子を用いることにより，挙動予測が容易となる．

上体回転運動を表すモデルは，全体重心を変化させずに上体を傾ける運動と床反力の関係を表す，質量 0 でイナーシャだけがあるフライホイールのモデルである．歩行歩容だけを生成するならば，このモデルはなくてもよい．

これらのモデルの挙動（運動と床反力）を合成することで，目標歩容を生成する．

2）定常旋回歩容に漸近する歩容生成（4.4 節）（5.4 節）

移動速度や旋回曲率などの歩行要求に応じて，暫定的な定常歩容を設定し，これに漸近するように今回歩容（これから生成する歩容）を生成することで，歩容生成の継続性を保証する．

3）今回歩容を定常歩容に漸近させるために倒立振子の発散成分に着目(4.3.2 節)(5.4.3 節)

上体並進運動に相当する倒立振子の運動の水平成分は，発散成分と収束成分に分解される．

「鉛直加速度が 0 の線形倒立振子」の発散成分は，式(4.11)により定義される．「鉛直方向の加速度変化を伴う倒立振子」の場合では，式(5.30)により「定常歩容の初期収束成分」が定義される．

今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させることで，今回歩容を定常歩容に漸近させる．

発散成分を一致させる方法は，倒立振子位置と速度の両方を一致させる方法に比べて，境界条件が緩和されるので，境界条件を満足させるための目標 ZMP 軌道の修正量を小さくすることができ，修正された ZMP 軌道は支持多角形を逸脱しにくくなる．この結果，急激な運動変化を伴うような様々な歩行・走行に対しても，動バランスが良くかつ継続性が保証された歩容を生成することが可能となった．

4）床反力水平成分の許容範囲を満足する歩容生成（5.3.5 節）

水平床反力の許容範囲（床摩擦力の許容範囲）を設定し，これと目標 ZMP 軌道を満足するように上体水平軌道（倒立振子水平軌道）と上体姿勢軌道（フライホイール軌道）を生成することで，スリップしにくい走行歩容が生成される．

基本的には，動力学モデル全体の運動が目標 ZMP を満足するように，(すなわち，動力学モデル全体が目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメント水平成分が 0 となるように)倒立振子の水平加速度を決定するが，水平床反力が許容範囲を逸脱する場合には，倒立振子の水平加速度が制限される．この制限によって削減された床反力モーメントを補う

ために，フライホイールが加速される．

鉛直床反力を 0，水平床反力の許容範囲を[0,0]に設定するだけで，自動的に重心は放物運動となり，角運動量変化率は 0 となる．すなわち，本手法によって，滞空期と接地期の運動生成が統一的に表される．

5) 重心まわりの擬似角運動量保存（6.3 節）

単純モデルの状態の瞬間値に対して写像用モデルの姿勢（上体位置・姿勢と両足部位置・姿勢）を幾何学的に対応させる際に，以下の拘束条件を満足することで，動力学的精度を高めることができる．

拘束条件 1）写像用モデルの全体重心鉛直位置を，単純モデルの全体重心鉛直位置に一致させる．
拘束条件 2）写像用モデルの全体重心水平位置を，単純モデルの全体重心水平位置に一致させる．
拘束条件 3）付録 B の式(B.3)で表される重心まわりの擬似角運動量保存を満足させる．

拘束条件 1,2 に加え，拘束条件 3 も満足させると，膝の曲げ角に応じて，上体が前傾し，腰が後方に移動するように補正される．擬似角運動量保存は，角運動量変化誤差（写像用モデルの全体重心まわりの角運動量変化と単純モデルの全体重心まわりの角運動量変化の差）を，動力学を用いずに低減する手法であると言える．

6) 水平床反力の許容範囲と目標ＺＭＰまわりのモーメントの許容範囲を満足する歩容補正（6.6.3 節）（6.6.4 節）（6.6.5 節）

フルモデル上で発生する目標 ZMP まわりの床反力モーメントが低減され，かつ，水平床反力と目標 ZMP まわりの床反力モーメントが許容範囲を越えないように，補正用倒立振子モデルと補正用フライホイールモデルを用いて，近似歩容の上体位置と姿勢角を補正する．これにより，スリップしにくいように歩容が補正される．滞空期においては，両許容範囲を，共に 0 に設定するだけで，全体重心が放物運動を行い，重心まわりの角運動量が保存されるように，運動が補正される．

【大局的姿勢安定化制御に関して】

a) 複合コンプライアンス制御とモデル ZMP 制御と長期シナリオ修正制御から成る制御（9.2 節）

大局的姿勢安定化制御は，床反力制御（複合コンプライアンス制御）、モデル ZMP 制御および長期シナリオ修正制御の 3 つのコア技術から成る．大局的姿勢安定化制御は，複合コンプライアンス制御によって，片脚支持期，両脚支持期いずれにおいても，上体位置・姿勢偏差の挙動が，目標 ZMP を支点とする倒立振子の挙動になるように制御され

ていることを前提とする制御である．この前提により，上体傾き偏差は，単なる上体部分の傾きではなく，ロボット全体の傾きを代表することとなる．

b) 複合コンプライアンス制御（第８章）

複合コンプライアンス制御は，目標 ZMP まわりに両足部を公転させ，さらに目標支持脚/遊脚 COP まわりに支持脚/遊脚足部を自転させることで，床の想定外の凹凸が各脚床反力に及ぼす影響を低減すると共に，姿勢を安定化するために必要な床反力モーメント（床反力モーメント要求値）を目標 ZMP まわりに発生させる床反力制御である．

複合コンプライアンス制御は，床形状偏差推定器を備える．床形状偏差推定器によって推定された床形状偏差を両足部の目標位置・姿勢に加えることで，床に想定しない凹凸があっても，この影響による床反力定常偏差を打ち消すことができる．

なお，ガイド付きゴムブッシュと発泡ゴムインナーソールから成る足部柔軟構造によって，複合コンプライアンス制御の衝撃吸収能力と安定性が向上する．

c) モデル ZMP 制御（9.2 節）（9.3 節）

モデル ZMP 制御は，目標運動に対する実ロボットの傾き（上体傾き偏差）を低減するために，目標歩容を生成する動力学モデルに仮想外力を加える制御である．目標 ZMP を操作する制御であるとも言える．

仮想外力が目標 ZMP まわりに作用するモーメントの（-1）倍の姿勢復元力が，実ロボットに発生する．

d) 長期シナリオ修正制御（9.2 節）（9.5 節）

長期シナリオ修正制御は，モデル ZMP 制御によって崩された目標歩容の現在時刻状態を初期状態として，所定の目的が達成されるように長期シナリオ（目標歩容列）を修正する制御である．

e) 分配器（9.4 節）（Fig.9.7）（9.5 節）（9.6 節）

分配器は，姿勢を回復させるために必要な復元力を，実床反力モーメントと仮想外力モーメントそれぞれに分担させる量を決定する．すなわち，踏ん張りによって発生させる復元力モーメントと，仮想外力（目標運動の崩し）によって発生する復元力モーメントを決定する．目標運動の崩しと踏ん張りが同じ次元（力のモーメント）で扱うことができるので，姿勢安定化効果を定量的に設計でき，姿勢安定性を保証することができる．

f) 発散成分予測値を低減するような安定化ゲイン設計（付録 C）（6.6.1 節）（6.7 節）（8.10 節）

フルモデル補正用倒立振子を安定化するためのモーメントは，倒立振子の鉛直加速度が 0 に場合には，倒立振子の発散成分にゲインを乗じることで決定すればよい．倒立振子の鉛直加速度が 0 に場合には，今回歩容終端での発散成分予測値が低減するよ

うに，付録 C のように決定するとよい．これによって，モーメントの二乗平均値が小さくなる．

上体傾き偏差を 0 に収束するための復元力モーメント要求値も，同様に決定するとよい．これによって，復元力モーメント要求値の二乗平均値が小さくなり，接地圧分布が偏りにくくなるので，接地性を高めスピンを抑制する効果がある．複合コンプライアンス制御による床反力制御では，実際に発生する床反力モーメントと目標値の比率が，状況によって変動する．すなわち，姿勢安定化フィードバックゲインが変動するが，このようなゲイン変動が，ある程度発生しても，上記にように復元力モーメント要求値を決定することで，オーバーシュートや振動の発生など，姿勢安定性に悪影響を及ぼすことがほとんどなくなる．

以上の提案した手法により，歩行，走行など多様な歩容が統一的に生成され，また，多様な姿勢復元動作がすべて復元力の次元で定量的に表されるので，自在な移動が可能となると共に，多様な動作が組み合わさった複合的な姿勢復元動作においても，適切な復元力を発生させることが可能となった．

10.2 今後の発展性

本論文では，シナリオ作成部に関しては具体的な議論を行わなかったが，今後は，障害物回避と姿勢安定化の両立など，より複雑な制約条件下でも安定な移動を実現していくために，シナリオ作成における知能化が重要な課題となってくる．しかし，目的に合わせた最適な成功シナリオをリアルタイムに探索することは，事実上，今後少なくとも数年は，ロボットに搭載可能な CPU では不可能である．そこで，最適な成功シナリオを見つけるまでの間は，モデル ZMP 制御によって崩された歩容を可能な範囲で徐々に元の歩容に戻すなど，反射レベルの短期的シナリオ修正をとりあえず実行してしのぎ，その後に最適なシナリオに誘導する，という方法が考えられる．今後は，このような短期と長期の階層構造を持った柔軟なシナリオ作成部の開発が望まれる．

ハードウェアに関しては，人型ロボットが人と共存し協調動作を行うために，もっと人と親和性の高い，人の筋骨格系に匹敵するような柔軟なロボットシステムの開発が望まれる．

筆者は，これらの開発にあたり，本論文で提案した手法の基本概念を基盤としつつ，2 関節筋など人の筋骨格の特徴や，脊髄反射や CPG など人の神経系の特徴をロボットに導入することで，メカ，制御，知能すべてが人間のように柔軟でロバストなロボットシステムが実現できるものと考えている．このシステムの実現が，筆者の最大の研究課題である．

謝辞

日本ロボット学会への論文投稿から本論文をまとめるまで，東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻 山北昌毅准教授から，終始懇切なるご指導を賜りました．山北先生には，心より感謝の意を表します．

ロボット研究を進めるにあたり，哲学的な面から支えていただいた東京工業大学名誉教授 森政弘先生に，深く感謝いたします．

株式会社 本田技術研究所 基礎技術研究センターでのヒューマノイドロボット研究従事へと導いて下さった鶴賀孝廣氏に，心より感謝致します．

最後に，シミュレーションおよび実験に協力して頂いた同センターの同僚ならびに後輩の皆様に感謝の意を表します．

付録

付録 A 本論文で定義される COP と一般的な COP との関係

床面が水平面である場合には,本論文で定義される COP と一般的に定義される COP’は一致するが，斜面では，一致するとは限らない.（斜面まで含むと厳密には，支持多角形は，本論文で定義される COP の存在可能範囲ではなく，COP’の存在可能範囲である.）

本論文では斜面での歩行を議論しないが，補足として，以下に，床面が斜面である場合における COP と COP’の関係を示す.

Fig.A1 に示すように，XYZ座標系において，水平面に対してY軸まわりにθ_{slope}（本図では正の場合を表す）だけ傾斜している床に床反力が発生しているものとする.

本節では，各ベクトルの下の添え字は，そのベクトルのXYZ座標系でのX,Y,Z成分を表すものとする.

床反力の並進力ベクトルをFとする．COP における床反力モーメントベクトルをMとする．COP の定義より,M_xとM_yは0である.COP’における床反力モーメントベクトルをM^αとする．COP’の定義より，M^αの床面平行成分（床面法線に直交する方向の成分）は 0 である.（Fig.A1 に示すように，床面内にY軸と平行なY^α軸と，Y^α軸に直交するX^α軸とから成る直交座標系を考えると，ベクトルM^αは，X^α軸とY^α軸に直交する.）したがって，M_y^αは 0 である.

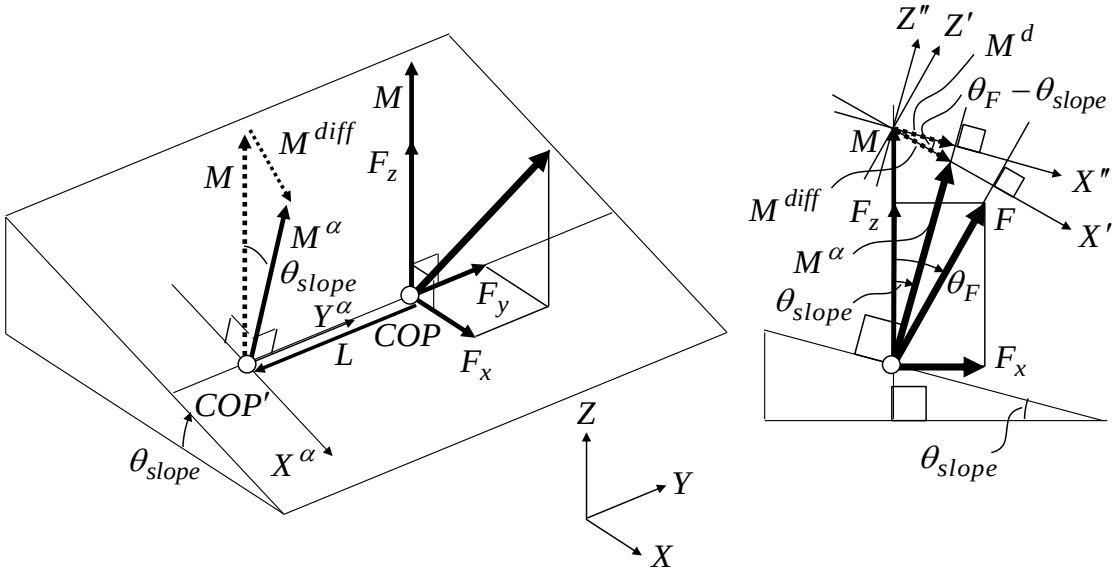


Fig.A1 COP and COP’

次式のように，θ_Fを鉛直方向に対するベクトルFのY軸まわり角度とする.

$$\theta_F = \mathrm{atan}\left(\frac{F_x}{F_z}\right) \tag{A.1}$$

ベクトルFは，床の内から外への向きのベクトルとする．（すなわち，床面法線方向成分が正であるとする.）したがって，次式を満足する．

$$\left|\theta_F - \theta_{slope}\right| < \frac{\pi}{2} \tag{A.2}$$

故に，次式が成り立つ．

$$\cos\left(\theta_F - \theta_{slope}\right) > 0 \tag{A.3}$$

F_x，F_zは，次のようになる．

$$F_x = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}\sin\theta_F \tag{A.4}$$

$$F_z = \sqrt{F_x^2 + F_z^2}\cos\theta_F \tag{A.5}$$

次式のように，ベクトルM^αとベクトルMの差ベクトルをM^{diff}とする．

$$M^{diff} = M^\alpha - M \tag{A.6}$$

上記のように，M_yとM_y^aは，いずれも 0 であるので，M_y^{diff}も 0 である．

COP を始点とし COP’を終点とするベクトルをLとする．力と作用点の等価変換の関係より，Lは次式を満足する．

$$M^{diff} = -L \times F \tag{A.7}$$

ところで，COP と COP’が共に床面上の点であることから、ベクトルLは，床面に平行なベクトルである．ここで，ベクトルLが，斜面等高線方向のベクトル方向のベクトル）でないと仮定すると，ベクトルFの床面法線方向成分が 0 でないので，M_y^{diff}が 0 でないことになり，矛盾が生じる．したがって，ベクトルLは，斜面等高線方向のベクトル（Y軸（Y^α軸）方向のベクトル）である．故に，

$$M_x^{diff} = -L_y F_z \tag{A.8}$$

$$M_z^{diff} = L_y F_x \tag{A.9}$$

原点がベクトルM^{diff}の始点にあり，XYZ座標系に対して，Y軸まわりにθ_Fだけ回転させた

座標系を$X'Y'Z'$座標系とする．ベクトルM^{diff}を$X'Y'Z'$座標系で表現したときのX'成分を$M_{x'}^{diff}$，Z'成分を$M_{z'}^{diff}$とすると，これらは，次のようになる．

$$M_{x'}^{diff} = M_x^{diff}\cos\theta_F - M_z^{diff}\sin\theta_F \tag{A.10}$$

$$M_{z'}^{diff} = M_x^{diff}\sin\theta_F + M_z^{diff}\cos\theta_F \tag{A.11}$$

式(A.4)(A.5)(A.8)(A.9)(A.10)より，次式を得る．

$$\begin{aligned} M_{x'}^{diff} &= -L_y F_z\cos\theta_F - L_y F_x\sin\theta_F \\ &= -L_y\sqrt{F_x^2+F_z^2}\cos\theta_F\cos\theta_F - L_y\sqrt{F_x^2+F_z^2}\sin\theta_F\sin\theta_F \\ &= -L_y\sqrt{F_x^2+F_z^2} \end{aligned} \tag{A.12}$$

原点がベクトルM^{diff}の始点にあり，XYZ座標系に対して，Y軸まわりにθ_{slope}だけ回転させた座標系を$X"Y"Z"$座標系とする．

ベクトルMの終点を始点，ベクトルMの終点からベクトルM^{α}への垂直投影点を終点とするベクトルをM^dとする．ベクトルM^dを$X"Y"Z"$座標系で表現したときの$X"$成分を$M_{x"}^d$，$Z"$成分を$M_{z"}^d$とする．ベクトルMとベクトルM^dを辺として含む三角形に注目することにより，$M_{x"}^d$とM_zに関する次式を得る．

$$M_{x"}^d = M_z\sin\theta_{slope} \tag{A.13}$$

ベクトルM^d，ベクトルM^{diff}を辺として含む三角形に注目することにより，$M_{x"}^d$と$M_{x'}^{diff}$に関する次式を得る．

$$M_{x"}^d = M_{x'}^{diff}\cos\left(\theta_F - \theta_{slope}\right) \tag{A.14}$$

式(A.12)(A.13)(A.14)より，L_yの厳密解として次式を得る．

$$L_y = -\frac{M_z\sin\theta_{slope}}{\sqrt{F_x^2+F_z^2}\cos\left(\theta_F-\theta_{slope}\right)} \tag{A.15}$$

以下では，$\sin\theta_{slope} \ll 1$　かつ　$|\theta_F| < \frac{\pi}{4}$　であることを前提として近似解を求める．

式(A.15)より，次式を得る．

$$L_y = -\frac{M_z \sin\theta_{slope}}{\sqrt{F_x^2 + F_z^2}(\cos\theta_F \cos\theta_{slope} - \sin\theta_F \sin\theta_{slope})} \tag{A.16}$$

前提より上式の分母の sin の項は無視できることと，(A.5)より，次の近似式を得る．

$$\begin{aligned} L_y &\cong -\frac{M_z \sin\theta_{slope}}{\sqrt{F_x^2 + F_z^2}\cos\theta_F \cos\theta_{slope}} \\ &= -\frac{M_z}{F_z}\tan\theta_{slope} \end{aligned} \tag{A.17}$$

さらに，$\tan\theta_{slope}$をθ_{slope}に近似して次式を得る．

$$L_y \cong -\frac{M_z}{F_z}\theta_{slope} \tag{A.18}$$

本論文で提案する歩容生成手法においては，腰ヨー軸まわりに胸部を旋回させることによって，目標 ZMP（すなわち目標 COP）での慣性力モーメント鉛直成分が低減されるので，勾配が 10%以下の床を 3[km/h]以下で歩行する場合，式(A.15)または式(A.18)によって求められるL_yの大きさは，数[mm]程度に抑えられる．

歩容生成において復元力余裕を厳密に設定するためには，支持多角形に対して COP’軌道を適切に設計する必要があるが，実質的には，上記の議論より，L_yの大きさを見越して小さめに見積もった支持多角形に対して，COP 軌道（すなわち ZMP 軌道）を適切に通すことを考えればよい．

なお，サジタル面での運動のみ，あるいはラテラル面での運動のみを考える場合には，そもそも鉛直軸まわりのモーメントは考えないので，COP と COP’は，斜面上でも一致し，床反力の作用線と床面との交点となる．

付録 B 重心まわりの擬似角運動量保存

拘束条件 1,2 を満足させることに加えて，式(B.1)のように，単純モデルの重心まわりの角運動量変化率と写像用モデルの重心まわりの角運動量変化率も一致させれば，単純モデルの床反力と写像用モデルの床反力を一致させることができる．

$$
\begin{aligned}
&\sum_j \frac{d}{dt}\left\{m_j^{full}\left(z_j^{full}-z_{cog}^{full}\right)\left(\dot{x}_j^{full}-\dot{x}_{cog}^{full}\right)\right\}\\
&-\sum_j \frac{d}{dt}\left\{m_j^{full}\left(x_j^{full}-x_{cog}^{full}\right)\left(\dot{z}_j^{full}-\dot{z}_{cog}^{full}\right)\right\}+\sum_j \frac{d}{dt}I_j\dot{\theta}_j\\
&=\sum_i \frac{d}{dt}\left\{m_i^{smpl}\left(z_i^{smpl}-z_{cog}\right)\left(\dot{x}_i^{smpl}-\dot{x}_{cog}^{smpl}\right)\right\}\\
&-\sum_i \frac{d}{dt}\left\{m_i^{smpl}\left(x_i^{smpl}-x_{cog}^{smpl}\right)\left(\dot{z}_i^{smpl}-\dot{z}_{cog}\right)\right\}+\frac{d}{dt}I_{wheel}\dot{\theta}_{wheel}^{smpl}
\end{aligned}
\tag{B. 1}
$$

ここで，iは，$pend, sup, swg$を表し，jは，写像用モデルのリンク番号（上体を含む）を表す．$m_i^{smpl}, x_i^{smpl}, z_i^{smpl}$は，それぞれ単純モデルの各質点の質量，水平位置，鉛直位置を表す．$m_i^{full}, x_i^{full}, z_i^{full}$ は，それぞれ写像用モデルの各質点の質量，水平位置，鉛直位置を表す．$x_{cog}^{full}, z_{cog}^{full}$は，それぞれ写像用モデルの重心の水平位置，鉛直位置を表す．

しかし，この場合には，梶田ら[16]の「分解角運動量制御」に述べられているように，写像用モデルの姿勢が発散する．そこで，式(B. 1)において，$\left(z_i^{smpl}-z_{cog}\right), \left(z_j^{full}-z_{cog}^{full}\right)$を，それぞれ，基準姿勢（基準となる直立静止姿勢）での値C_i^{smpl}, C_j^{full}に固定する．この場合，式(B. 1)は，次式となる．

$$
\begin{aligned}
&\sum_j \frac{d}{dt}\left\{C_j^{full}m_j^{full}\left(\dot{x}_j^{full}-\dot{x}_{cog}^{full}\right)\right\}+\sum_j \frac{d}{dt}I_j\dot{\theta}_j\\
&=\sum_i \frac{d}{dt}\left\{C_i^{smpl}m_i^{smpl}\left(\dot{x}_i^{smpl}-\dot{x}_{cog}^{smpl}\right)\right\}+\frac{d}{dt}I_{wheel}\dot{\theta}_{wheel}^{smpl}
\end{aligned}
\tag{B. 2}
$$

式(B. 2)を 2 階積分し，特殊解として次式を得る．

$$
\begin{aligned}
&\sum_j C_j^{full}m_j^{full}\left(x_j^{full}-x_{cog}^{full}\right)+\sum_j I_j\theta_j\\
&=\sum_i C_i^{smpl}m_i^{smpl}\left(x_i^{smpl}-x_{cog}^{smpl}\right)+I_{wheel}\theta_{wheel}^{smpl}+C_{st}
\end{aligned}
\tag{B. 3}
$$

ただし，積分定数C_{st}は，基準姿勢時に両辺が一致するように設定する．

式(B. 3)を擬似角運動量保存式とする．これと拘束条件 1, 2 を満足させるように上体の重心移動量と回転角を補正することで，単純モデルの床反力と写像用モデルの床反力とをかなり一致させることができる．

なお，式(B. 3)において，写像用モデルだけに固有な項のうちで主なものは，膝の屈伸に伴う上腿リンクおよび下腿リンクの運動の項と，これを打ち消すための上体の補償運動の項であるので，式(B. 3)の代わりに，この関係だけを近似的に抽出した式を擬似角運動量保存式としてもよい．

付録 C 倒立振子安定化制御則

以下は，6.6.1 節の STEP3)における倒立振子安定化制御則に関する．

倒立振子安定化制御則は，Fig.C1 の点線枠内に示すように，x_{pend}の目標位置x_{pend}^{target}を決定する演算と，x_{pend}をx_{pend}^{target}に収束させる PD 制御演算から成る．

M_{full}に長期的な偏りがある場合（M_{full}の平均値が 0 でない場合），M_{pend_stab}にも長期的な偏りが発生する．この偏りを低減するためには，目標位置x_{pend}^{target}を，その位置に倒立振子位置x_{pend}が来たときの重力モーメントがM_{full}の偏りにつり合うように設定すればよいと考えられる．そこで，Fig.C1 に示すように，M_{full}を$1/(m_{pend}g)$倍してローパスフィルタに通した値を，目標位置x_{pend}^{target}とする．なお，FB 型補正手法の場合には，$K_M M_{err}$の積分値を$1/(m_{pend}g)$倍してローパスフィルタに通した値を，目標位置x_{pend}^{target}とすればよい．

ところで，第５章では，定常歩容に漸近する今回歩容を設計するにあたり，定常歩容の発散成分に注目することで，目標 ZMP の変動を低く抑えられることを述べた．以下では，Fig.C1 のゲイン設計においても，発散成分に着目することで，倒立振子安定化モーメントの変動を低く抑えることを考える．なお，第５章と同一の表記が現れるが，第５章では，近似歩容生成用の単純モデルに関する表記であったのに対し，ここでは，補正用倒立振子モデルに関する表記として用いる．

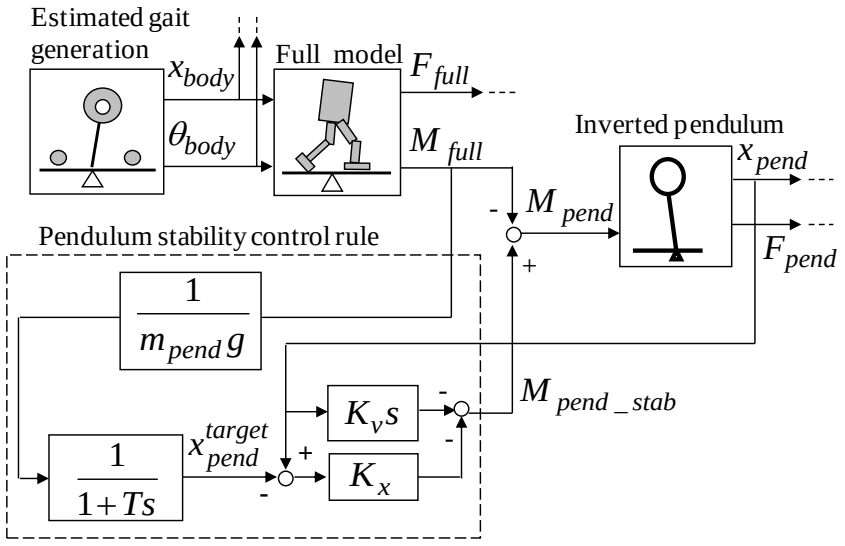


Fig.C1 Pendulum stability control rule

まず，式(6.3)を，次式のように離散形の状態方程式で表現する．ただし，“T”は転置を表す．

$$\mathbf{x}(k+1) = A(k)\mathbf{x}(k) + B(k)\mathbf{u}(k) \quad \mathbf{x}(k) = \left(x_{pend}(k) \quad \dot{x}_{pend}(k)\right)^T \quad \mathbf{u}(k) = M_{pend}(k) \qquad (C.1)$$

初期状態$x(0)$と入力時系列$u(k)$が与えられたとき，$x(k)$は，次式のようになる．

$$\mathbf{x}(k)=\phi(k,0)\mathbf{x}(0)+\sum_{i=0}^{k-1}\phi(k,i+1)B(i)\mathbf{u}(i) \tag{C. 2}$$

ただし，

$$\phi(k,j)=\begin{cases}A(k-1)A(k-2)\cdots A(j) & (k>j)\\ I & (else)\end{cases} \tag{C. 3}$$

ここで，定常歩容の初期時刻を時刻 0，定常歩容の終端時刻をk_{cyc}^{E}，時刻kでの補正用倒立振子モデルの状態を$x_{cyc}(k)$，時刻kでの状態遷移行列を$A_{cyc}(k)$とし，入力が常に 0 であるとする．この場合，式(C. 2)(C. 3)の関係により，次の関係が成立する．

$$\mathbf{x}_{cyc}(k_{cyc}^{E})=\phi_{cyc}(k_{cyc}^{E},0)\mathbf{x}_{cyc}(0) \tag{C. 4}$$

ただし，

$$\phi_{cyc}(k,j)=\begin{cases}A_{cyc}(k-1)\cdots A_{cyc}(j) & (k>j)\\ I & (else)\end{cases} \tag{C. 5}$$

式(5. 25)のΓ_{cyc}を用いて，次式のように$\mathbf{x}_{cyc}(k)$を$(p_{cyc}(k)\quad q_{cyc}(k))^{T}$に変換する．

$$\begin{pmatrix}p_{cyc}(k) & q_{cyc}(k)\end{pmatrix}^{T}=\Gamma_{cyc}^{-1}\mathbf{x}_{cyc}(k) \tag{C. 6}$$

これを式(C. 4)に代入して，次式を得る．

$$\begin{pmatrix}p_{cyc}(k_{cyc}^{E}) & q_{cyc}(k_{cyc}^{E})\end{pmatrix}^{T}=\Lambda\begin{pmatrix}p_{cyc}(0) & q_{cyc}(0)\end{pmatrix}^{T} \tag{C. 7}$$

ただし，

$$\Lambda=diag(\lambda_p,\lambda_q) \tag{C. 8}$$

5. 4. 3 節で述べたように，上式のλ_p,λ_qは，$\phi_{cyc}(k_{cyc}^{E},0)$の固有値であり，$\lambda_q$は 1 より大きい実数，$\lambda_p$は 1 より小さい実数である．

以上の関係から，定常歩容の生成を時刻 0 から開始し，時刻k_{cyc}^{E}になったら，改めて時刻 0 として，定常歩容をn回繰り返すと，$p_{cyc}(0)$は$(\lambda_p)^{n}$倍になり，$q_{cyc}(0)$は$(\lambda_q)^{n}$倍になる．すなわち，$p_{cyc}(0)$は 0 に収束し，$q_{cyc}(0)$は発散する傾向を持つ．そこで，$q_{cyc}(0)$を「定常歩容初期での補正用倒立振子モデルの発散成分」，$p_{cyc}(0)$を「定常歩容初期での補正用倒立振子モデルの収束成分」と呼ぶ．（以降，それぞれを単に，発散成分，収束成分と略す．）

定常歩容初期時刻において，倒立振子が直立静止していなくても，そのときの状態から式

(C. 6)によって求められる$q_{cyc}(0)$が 0 であれば，その後，定常歩容を繰り返すうちに，倒立振子は直立静止状態に収束する．

以下では，現在時刻を含む歩容を今回歩容とし，今回歩容の後に上記定常歩容がつながっていると想定した上で，現在状態から予想される定常歩容初期（すなわち，今回歩容の終端）での補正用倒立振子モデルの発散成分を 0 に近づけるように，倒立振子モーメントM_{pend}を決定することを考える．ただし，現在時刻以降，x_{pend}の目標位置x_{pend}^{target}とM_{full}は 0 であるとする．なお，4. 1 節では，今回歩容の定義を「現在時刻から生成される歩容」としたが，ここでは，より一般的に，「現在時刻を含む歩容」とする．

まず，改めて今回歩容の初期時刻を時刻 0，今回歩容の終端時刻をk_{curr}^{E}，現在時刻を$k(0 \le k < k_{curr}^{E})$とし，時刻$j(k \le j \le k_{curr}^{E})$での倒立振子状態を$(x_{pend}(j) \quad \dot{x}_{pend}(j))^{T}$，時刻$j$での状態遷移行列と入力行列をそれぞれ$A_{curr}(j)$，$B_{curr}(j)$とする．また，式(C. 5)と同様，$\phi_{curr}(k,j)$を，次式のように定義する．

$$\phi_{curr}(k,j)=\begin{cases} A_{curr}(k-1)\cdots A_{curr}(j) & (k>j) \\ I & (else) \end{cases} \tag{C. 9}$$

また，時刻jでの位置・速度が$(x_{pend}(j) \quad \dot{x}_{pend}(j))^{T}$である倒立振子に 0 を入力し続けた場合に予測される時刻k_{curr}^{E}の倒立振子状態$\left(x_{pend}(k_{curr}^{E}) \quad \dot{x}_{pend}(k_{curr}^{E})\right)^{T}$を基に，次式を用いて求めた収束・発散成分を，「時刻jでの位置・速度が$(x_{pend}(j) \quad \dot{x}_{pend}(j))^{T}$である倒立振子の収束・発散成分予測値」と呼び，$\left(p_j^{E} \quad q_j^{E}\right)^{T}$と表記する．

$$\left(p_j^{E} \quad q_j^{E}\right)^{T}=\Gamma_{cyc}{}^{-1}\left(x_{pend}(k_{curr}^{E}) \quad \dot{x}_{pend}(k_{curr}^{E})\right)^{T} \tag{C. 10}$$

式(C. 2) (C. 9) (C. 10)の関係より，$(p_k^{E} \quad q_k^{E})^{T}$は，次式によって求められる．

$$\begin{pmatrix} p_k^{E} \\ q_k^{E} \end{pmatrix}=\Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k)\begin{pmatrix} x_{pend}(k) \\ \dot{x}_{pend}(k) \end{pmatrix} \tag{C. 11}$$

現在時刻kでの位置・速度が$(x_{pend}(k) \quad \dot{x}_{pend}(k))^{T}$である倒立振子に，1 サンプリング周期だけ，あるモーメントM_{pend}が矩形波状に入力された場合において，時刻$(k+1)$での位置・速度が$(x_{pend}(k+1) \quad \dot{x}_{pend}(k+1))^{T}$になるものとする．

式(C. 1)(C. 11)の関係より，この場合，時刻$(k+1)$での位置・速度が$(x_{pend}(k+1) \quad \dot{x}_{pend}(k+1))^{T}$である倒立振子の収束・発散成分予測値$(p_{k+1}^{E} \quad q_{k+1}^{E})^{T}$は，次式のようになる．

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} p_{k+1}^E \\ q_{k+1}^E \end{pmatrix} &= \Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k+1)\begin{pmatrix} x_{pend}(k+1) \\ \dot{x}_{pend}(k+1) \end{pmatrix} \\ &= \Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k+1)\left\{A(k)\begin{pmatrix} x_{pend}(k) \\ \dot{x}_{pend}(k) \end{pmatrix} + B_{curr}(k)M_{pend}\right\} \\ &= \Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k)\begin{pmatrix} x_{pend}(k) \\ \dot{x}_{pend}(k) \end{pmatrix} \\ &\quad + \Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k+1)B_{curr}(k)M_{pend}\end{aligned} \tag{C. 12}$$

ここで，特殊な場合として，式(C. 13)(C. 14)のように，現在時刻kにおいて任意の位置x_aに停止している倒立振子に，あるM_{pend}が入力されることによって，時刻$(k+1)$においても位置x_aで停止状態を維持している場合を考える．

$$\begin{pmatrix} x_{pend}(k) & \dot{x}_{pend}(k) \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} x_a & 0 \end{pmatrix}^T \tag{C. 13}$$

$$\begin{pmatrix} x_{pend}(k+1) & \dot{x}_{pend}(k+1) \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} x_a & 0 \end{pmatrix}^T \tag{C. 14}$$

この場合，時刻$(k+1)$での倒立振子位置・速度から求められる発散成分予測値q_{k+1}^Eは，式(C. 11)において，kに$(k+1)$を代入し，さらに式(C. 14)を代入することによって求められる．したがって，この場合におけるq_{k+1}^Eとq_k^Eの比を$\alpha_{still}(k)$とすると，$\alpha_{still}(k)$は，式(C. 15)のように，x_aに依存しない値となる．

$$\alpha_{still}(k) = \frac{q_{k+1}^E}{q_k^E} = \frac{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}\Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k+1)\begin{pmatrix} x_a \\ 0 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}\Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k)\begin{pmatrix} x_a \\ 0 \end{pmatrix}} = \frac{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}\Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k+1)\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix}\Gamma_{cyc}{}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^E, k)\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}} \tag{C. 15}$$

倒立振子を原点に収束させるためには，q_{k+1}^Eとq_k^Eの比を$\alpha_{still}(k)$よりもさらに小さくすべきであると考えられる．そこで収束時定数T_{conv}を設定し，改めて，q_{k+1}^Eとq_k^Eの比を次式によって決定することとする．

$$\frac{q_{k+1}^E}{q_k^E} = \alpha_{still}(k)e^{-\Delta T / T_{conv}} \tag{C. 16}$$

なお，収束時定数T_{conv}は，例えば，$\ddot{z}_{pend} = 0$のときの線形倒立振子の発散時定数に設定すればよい．式(C. 11) (C. 12) (C. 16)より，式(C. 16)を満足するM_{pend}は，次式のようになる．

$$M_{pend} = -\left(1-\alpha_{still}(k)e^{-\Delta T/T_{conv}}\right)\frac{\begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k)\begin{pmatrix}x_{pend}(k)\\ \dot{x}_{pend}(k)\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k+1)B_{curr}(k)} \tag{C. 17}$$

したがって，Fig. C1 のゲインを，次のように設定すればよい.

$$K_x = \frac{\left(1-\alpha_{still}(k)e^{-\Delta T/T_{conv}}\right)\begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k)\begin{pmatrix}1\\ 0\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k+1)B_{curr}(k)} \tag{C. 18}$$

$$K_v = \frac{\left(1-\alpha_{still}(k)e^{-\Delta T/T_{conv}}\right)\begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k)\begin{pmatrix}0\\ 1\end{pmatrix}}{\begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}\Gamma_{cyc}^{-1}\phi_{curr}(k_{curr}^{E},k+1)B_{curr}(k)} \tag{C. 19}$$

以上のようにx_{pend}の目標位置とゲインを設定することにより，倒立振子安定化モーメントの変動と偏りを小さく抑えることができる.

付録 D 用語の定義

以下に，本論で用いられる主な用語の定義を，アイウエオ順に列挙する．なお，「＝」は同義語を表す．「→」は参照を表す．

---------- ア行 ----------

【足首コンプライアンス制御】

足首関節角操作によるコンプライアンス制御．(7.4 節)

【一歩の期間】

原則として，一方の脚が離床してから他方の脚が離床するまでの期間．ただし，静止状態からの第 1 歩に関しては，静止状態を初端とし，一方の脚が離床し次に他方の脚が離床する瞬間を終端とする期間とする．歩行状態から静止する歩容に関しては，最後に脚が離床してから両足部が静止するまでの期間とする．

【運動パターン】(Motion pattern)

上体軌道と両足部軌道の組．→軌道

補足すると，ASIMO の脚機構は，片脚あたり 6 自由度であるので，上体の位置・姿勢と両足部の位置・姿勢が与えられれば，脚のすべての関節角度が，キネマティクス演算によって解析的に求められる．

【鉛直モーメント】(Vertical Moment)

モーメントの鉛直軸まわり成分．＝モーメント鉛直成分

【鉛直床反力】

床反力の並進力鉛直成分．＝総合鉛直床反力　＝床反力鉛直成分

---------- カ行 ----------

【回転運動】

＝上体回転運動

【仮想外力】 (Virtual external force)

歩容生成用の動力学モデルの上体に作用させる仮想の外力．この分だけ目標歩容の総慣性力と床反力（目標床反力）のバランスが崩れる．例えば，実ロボットの関節角（変位）を基本的に目標歩容に追従させつつ，複合コンプライアンス制御によって，実床反力が目標床反力に一致するように関節角（変位）を微調整すると，仮想外力分だけ動力学バランスが崩れるので，仮想外力の(-1)倍の力が実ロボットに作用したことと等価になる．故に，仮想外力によって上体傾き偏差を制御することができる．

【傾き】
姿勢の内の鉛直軸まわりの角度を除く成分.

【仮想外力モーメント】
仮想外力が目標 ZMP まわりに作用するモーメント.

【慣性力モーメント】
点Aまわりの慣性力モーメントとは，慣性力が点Aまわりに作用する力のモーメント.
鉛直方向成分は，総慣性力モーメントと一致する.

【写像用モデル】
幾何学的写像部用のフルモデル.

【軌道】(Trajectory)
部位Ａの軌道とは，部位Ａの位置と姿勢の軌道（時系列）を指す.

【脚質点 ZMP】(ZMP of foot mass)：
3 質点モデルにおいて，脚質点モーメントを擬似的に ZMP 換算したものであり，式(4.3)で定義される．→脚質点モーメント

【脚質点モーメント】(Moment of foot mass)：
3 質点モデルにおいて,脚質点によって発生する床反力モーメント.式(4.1)で定義される.

【脚床反力】(Ground reaction force of foot)：
床からロボットの各脚の足底に作用する力．本論文で扱う 2 脚ロボットにおいては，支持脚床反力と遊脚床反力がある．なお,「脚」が付かない単なる「床反力」は，支持脚床反力と遊脚床反力の合力を意味する.(場合によっては,支持脚床反力と遊脚床反力の組を意味する)力の基準点は，目標脚 COP に置くものとする．したがって，目標脚床反力のモーメント成分（目標脚床反力モーメント)のうちの水平方向成分(水平軸まわり成分)は 0 である.(Fig.3.3 参照)

【近似精度】
近似誤差の小ささ.

【近似誤差】
動力学モデルの動特性と実ロボットの動特性との差.
【今回歩容】(Current gait)
＝今回目標歩容

【今回目標歩容】(Current target gait)
現在時刻から生成されるひとつの目標歩容．原則として今回歩容の終端は，いずれかの脚が離床する瞬間とする．通常，今回歩容の期間は，1 歩未満から 2 歩程度に設定される．

---------- サ行 ----------

【作用点】
力 F の作用点とは，その点まわりの力 F のモーメントの水平成分が 0 となる点.
（水平床面において，力 F の並進力鉛直成分が 0 の場合には，力 F の作用点は不定である.）

【作用線】(Line of action)
力 F の作用線とは，力 F の作用点を通り力 F の並進力ベクトルに平行な直線．→作用点

【3 質点モデル】
倒立振子質点，支持脚足部質点および遊脚足部質点から成る動力学モデル．この動力学モデルは，上体を鉛直（または，所定の姿勢）に維持した歩行等の運動に対応するモデルである．(4.3.1 節) (5.3 節)

【COP】(Center Of Pressure)
その点まわりの床反力モーメントの水平成分が 0 となる床面上の点.すなわち，床面上の床反力作用点．(Fig.3.2 参照) →作用点
本論文での COP の定義は，一般的な定義とは異なる．→ COP’

【COP’】(Conventional Center Of Pressure)
一般的には，床面に発生する圧力とは，床面に発生する単位面積あたりの床面法線方向並進力の大きさである．そこで，一般的な COP を，次の定義 1 によって定義し，本論文で定義される COP と区別するために，COP’と記す.
COP’は，以下の定義 1 から 4 のいずれかによって定義される．ただし，床面は平面であるとする．定義 1 から 4 は等価である.

定義 1) 床からの圧力によってその点まわりに作用するモーメントが 0 となる床面上の点.
定義 2) 床反力から床摩擦力（床摩擦力並進力成分と床摩擦力モーメント）を除いた成分がその点まわりに作用するモーメントが 0 となる床面上の点.
定義 3) その点まわりの床反力モーメントのうちの床面平行成分が 0 となる床面上の点.
定義 4) その点まわりの床反力モーメントのうち，床面法線方向成分を除く成分が 0 となる床面上の点.

床面が水平面である場合には，COP と COP’は一致する.
床面が斜面である場合の COP と COP’の関係を 3.3 節に示す.

【次回目標歩容】(Next gait)
今回歩容の後に続く 1〜2 歩の歩容.

【次回歩容】(Next gait)
次回目標歩容の略.

【支持脚座標系】
支持脚の足裏が水平な床に面接触しているときの足首位置の床への鉛直投影点を原点とし，床に固定された座標系．支持脚足部の前方向を支持脚座標系のX軸方向，支持脚足部の左方向を支持脚座標系のY軸方向，鉛直方向を支持脚座標系のZ軸方向とする．(Fig.3.4 参照)
なお，実際のプログラムでは，右脚が支持脚となる歩容と左脚が支持脚となる歩容において動力学モデルの数式を共通化するために，技巧的ではあるが，筆者が用いるロボットが左右対称の構造であることを利用して，左脚支持期では座標系を，X軸Z軸を含む平面に対して反転させている．本論文では，理解の容易さを優先して，左脚支持期で反転しないこととする．
特にことわらない限り，位置，速度，力などは，今回歩容の支持脚座標系で示す.

【支持脚/遊脚】(Support leg / Swing leg)：
便宜上，歩容の終端で離床する脚を支持脚と呼び，他方の脚を遊脚と呼ぶ.

【支持脚/遊脚コンプライアンス動作】
支持脚/遊脚足部コンプライアンス角を決定し，この角度に応じて目標支持脚足部姿勢を回転させる動作．(8.6 節)

【支持脚/遊脚 COP】(COP of support/swing leg)
支持脚/遊脚の足底に作用する床反力の COP.その点まわりの支持脚/遊脚床反力モーメントの水平成分が 0 となる床面上の点．(Fig.3.3 参照)

【支持脚/遊脚 COP’】(COP’of support/swing leg)
支持脚/遊脚の足底に作用する床反力の COP’.その点まわりの支持脚/遊脚床反力モーメントの床面平行成分が 0 となる床面上の点．→COP’

【支持脚/遊脚支持多角形】
床が平面であることを前提としたときの，支持脚/遊脚の接地領域を包含する最小凸領域.
床が平面であり，かつ床面と足底の間には粘着力（負の圧力）が発生できない，という前提の下での支持脚/遊脚 COP’の存在可能領域．→支持脚/遊脚 COP’

【支持脚/遊脚たわみ角】
支持脚/遊脚の足部柔軟構造のたわみ角.

【支持脚/遊脚床傾斜角偏差】
実際の支持脚/遊脚床傾斜角（支持脚/遊脚の接地面の傾斜角）と想定支持脚/遊脚床傾斜角との差. ただし，想定支持脚/遊脚床傾斜角は，目標歩容を生成する際に想定した目標支持脚/遊脚 COP での床傾斜角であり，支持脚/遊脚足部が床に面接触している状況では，目標歩容の支持脚/遊脚足部姿勢の傾斜角成分に一致する.

【支持多角形】
床が平面であることを前提としたときの，ロボットのすべての接地領域を包含する最小凸領域.
床が平面であり，かつ床面と足底の間には粘着力（負の圧力）が発生できない，という前提の下での COP’の存在可能領域.
床面が水平面である場合には，COP と COP’は一致するので，COP の存在可能範囲も支持多角形となる.

【姿勢】(Posture or Orientation)
部位Ａの姿勢とは，部位Ａに固定された座標系の姿勢を指す. 回転マトリックスまたはオイラー角で表される.

【姿勢角】(Angle of Posture)
部位Ａの姿勢角とは，オイラー角で表された部位Ａの姿勢.

【実○○】(Actual)
実際の○○. 実際のロボットにおける○○. →目標○○

【実 ZMP】(Actual ZMP)
実際のロボットの運動状態から動力学演算によって算出される ZMP. または，実際のロボットの 6 軸力センサの検出値から算出される ZMP.

【瞬間的な動バランス】：
実ロボットと事実上，同じ特性を持った動力学モデルを用いて生成される目標歩容の姿勢に，実ロボットの姿勢が一致または収束しようとしていて，かつ，その瞬間において目標総慣性力と実床反力がつり合っていること.

【上体位置】(Position of upper body)
腰部の左右中央に定められた基準点の位置.

【上体回転運動】
全体重心位置を変えずに上体を傾ける運動.

【上体傾き】(Inclination of upper body)
上体姿勢の内の鉛直軸まわりの角度を除く成分. すなわち上体姿勢の内のロール角とピッチ角. 水平軸まわりの傾き.

【上体姿勢】(Posture or Orientation of upper body)
腰部の姿勢.

【上体水平運動】
上体の水平方向の並進運動.

【水平モーメント】 (horizontal Moment)
＝モーメント水平成分

【水平床反力】
床反力の並進力水平成分. (水平床面においては, 床摩擦力並進力成分)
＝総合水平床反力

【スピン】
足底接地部分と床との間で回転滑りが生じて, ロボット全体の鉛直軸まわりの角度偏差が発散すること.

【ZMP】(Zero Moment Point)
その点まわりの総慣性力のモーメントの水平成分が 0 となる床面上の点.
総慣性力の作用線と床面との交点.
総慣性力の床面上の作用点.
→作用線　→総慣性力
Fig.3.1に, 2次元空間を歩行する1質点系のロボットのZMPを示す.
1質点系では, 慣性力 (Inertial force) の作用線と重力 (Gravity force) の作用線は, 共に質点 (すなわち重心) を通り, これらの合力である総慣性力 (Total inertial force) の作用線も重心を通る. 多質点系またはイナーシャが存在する系では, 慣性力の作用線および総慣性力の作用線は重心を通るとは限らない.

【前回目標歩容】(Previous target gait)
今回歩容の直前の一歩.

【前回歩容】(Previous gait)
＝前回目標歩容.

【全床反力】
すべての脚床反力の合力.

【総慣性力】(Total inertial force)
ロボットの運動によって発生する慣性力と重力の合力.

【総慣性力モーメント】(Moment of total inertial force)
点Aまわりの総慣性力モーメントとは，総慣性力が点Aまわりに作用する力のモーメント.

【総合床反力】
ロボット全体重心の鉛直運動を表すモデル，上体の水平運動と脚質点運動を表すモデル，および上体の回転運動を表すモデルが発生する床反力の合力. (5.3.4 節)

【総合床反力モーメント】
4.3.1 節での定義： 3 質点モデルによって発生する，所定の点まわりの床反力モーメント(脚モーメントと倒立振子モーメントの和).
5.3.4 節での定義： 総合床反力の原点まわりモーメント.

【総合水平床反力】
総合床反力の並進力の水平成分. 略して水平床反力.

【総合鉛直床反力】
総合床反力の並進力の鉛直成分. 略して鉛直床反力.

【足部コンプライアンス動作】
支持脚コンプライアンス動作と遊脚コンプライアンス動作を合わせた動作. (8.6 節)

---------- タ行 ----------

【単純モデル】
単純な動力学モデル.

【長期シナリオ修正制御】
仮想外力によって変更された歩容生成用の動力学モデルの状態を初期値として，所定の目的を達成するために，改めて長期的に適切な目標歩容を作り直す制御.

【定常歩容】
2歩の歩容（1歩目を第1定常歩容，2歩目を第2定常歩容と呼ぶ.）を交互に繰り返し生成することで，グローバル座標系上での移動量を除き，連続で周期的な運動が生成される歩容.

【定常歩容の初期発散成分/収束成分（倒立振子の鉛直加速度が発生する場合）】
定常歩容 1 周期分の遷移行列を対角化する変換行列Γ_{cyc}と定常歩容の初期状態（倒立振子の位置・速度）を式(5.30)によって変換して得られる状態量$q_{cyc}(0)$が「定常歩容の初期発散成分」，状態量$p_{cyc}(0)$が「定常歩容の初期収束成分」．（5.4.3 節）
定常歩容のパラメータに従って、ある初期状態から歩容を繰り返し生成する（倒立振子の各時刻での状態量を逐次求める）場合，初期状態の発散成分が「定常歩容の初期発散成分」からずれていると，発散成分が発散する．初期状態の収束成分が「定常歩容の初期収束成分」からずれていても，収束成分は定常歩容の収束成分に収束する．

【定常歩容の連続性の条件】
定常歩容の初期状態と終端状態は，グローバル座標系上での位置と方向を除き，一致しなければならない.この条件を，定常歩容の連続性の条件と呼ぶ.

【等価変位ゲイン】
足首コンプライアンス制御は，足部柔軟構造のたわみ量を制御することになるので，一種の変位制御であると言える．アクチュエータ制御の観点からは，アクチュエータの変位制御と足首コンプライアンス制御は，変位の次元での並列のフィードバック制御とみなすことができるので，足首コンプライアンス制御のゲインを変位の次元に変換したものと変位制御のゲインの和を等価変位ゲインと呼ぶ．（7.4節）

【動バランスの良い歩容】
目標歩容であって，その運動パターンから動力学計算によって算出される総慣性力（目標総慣性力）と目標床反力がつり合っていると共に，復元力余裕が大きい目標歩容．→復元力余裕．→瞬間的な動バランス

【動力学的誤差】
実ロボットと同一の動特性を持つ理想的な動力学モデルを仮定し，そのモデルの運動を目標歩容の運動に一致させた場合に発生する総慣性力と，目標歩容の床反力との差.
→動力学精度

【動力学的精度】
動力学的誤差の少なさ．→動力学誤差

【倒立振子モーメント】(Moment of pendulum)：
3 質点モデルにおいて，倒立振子によって発生する床反力モーメント．→3 質点モデル

---------- ナ行 ----------

---------- ハ行 ----------

【発散成分/収束成分】
発散成分/収束成分は,倒立振子の状態量であり,それぞれ式(4.11)のq, pで表される成分．
→定常歩容の初期発散成分/収束成分（倒立振子の鉛直加速度が発生する場合）

【踏ん張り力】
目標ZMPまわりの復元力モーメント．

【復元力余裕】
床反力制御による姿勢安定化を行いながら実ロボットを目標歩容とおりに歩行・走行させたときに,最も倒れやすい方向に発生可能な踏ん張り力(目標ZMPまわりの復元力モーメント)の大きさ．

【復元力余裕が大きい歩容】
目標ZMP軌道が，極力，支持多角形の中央付近を通り，変動が少ない歩容．
目標ZMP軌道が支持多角形に対し偏りが少ない歩容．
（水平面内のあらゆる方向に復元力を発生させる余裕が大きいことが望ましいが，適切な歩容であっても，つま先立ちなど，ある方向に復元力が発生できなくなる瞬間が存在する場合がある．）

【複合コンプライアンス動作】
両脚コンプライアンス動作と足部コンプライアンス動作を協調させた動作．(8.6 節)

【フルモデル】
実ロボットと同一構成のリンクと関節から構成されるような詳細な動力学モデル．

【歩容】(Gait)
運動パターンと床反力パターンの組．すなわち，運動と床反力の組の時系列．ただし，目標床反力パターンの代わりに目標 ZMP 軌道を用いる場合もある．すなわち，運動パターンと ZMP 軌道の組を歩容という場合もある．目標 ZMP は，概念としては床反力ではないので，本来ならば,「目標 COP 軌道」と言うべきであるが．ZMP 規範型歩容生成の慣例に従って,「目標 ZMP」を用いることとする．
運動パターンと床反力パターンの組は，想定された移動環境において，運動方程式を満足

しているものとする．モデル ZMP 制御では，歩容生成用のロボット動力学モデルに対し，移動環境から床反力以外に仮想外力を作用させることによって歩容の運動が修正される．この場合には，運動パターンと床反力パターンの組は，仮想外力を含めることで運動方程式を満足する．

---------- マ行 ----------

【目標○○】
目標歩容の○○．→実○○

【目標 ZMP】(Target ZMP)
目標歩容の運動パターンが満足すべき ZMP 軌道．または逆に，目標歩容の運動パターンから動力学演算によって算出される ZMP．

【目標総慣性力】
目標歩容の運動パターンから動力学計算によって算出される総慣性力．

【目標歩容の継続性】
目標ZMPを満足するように上体位置・姿勢を決定する歩容生成において，無限に続く，ある歩容列の歩容パラメータを用いて歩容を生成し続けた場合に，上体位置・姿勢と両足部位置・姿勢で表される全体の姿勢が破綻しないこと．あるいは，上体水平位置が支持多角形から遠くに離れ過ぎないこと．

【モデル ZMP 制御】
仮想外力によって，目標歩容の総慣性力と床反力のバランスを崩すことで姿勢（上体傾き偏差）を安定化する制御．→仮想外力

【モーメント】(Moment)
力のモーメントの略

【モーメント水平成分】
モーメントの水平軸まわり成分．ピッチ軸まわりモーメントおよびロール軸まわりモーメント．

【モーメント鉛直成分】
＝鉛直モーメント

---------- ヤ行 ----------

【遊脚】
→支持脚/遊脚

【床反力】(GRF) (Ground Reaction Force)
床からロボットのすべての足底に作用する力の合力.すなわち,すべての脚床反力の合力.
すべての脚床反力の組の意味で使うこともある. (Fig.3.2参照)

【床反力鉛直成分】
床反力の並進力鉛直成分
＝鉛直床反力

【床摩擦力】(Friction of ground):
床と足裏との間の摩擦力であり，床面に平行な方向の並進力（床摩擦力並進力成分）と床法線方向まわりのモーメント（床摩擦力モーメント）から成る.

【床摩擦力並進力成分】(Translational element of friction of ground)
床反力の並進力成分のうちの床面に平行な方向の（すなわち床面法線方向と直交する方向の）成分.

【床摩擦力モーメント】(Moment of friction of ground)
床反力モーメントのうちの床面法線方向成分.

---------- ラ行 ----------

【理想歩行状態】
実ロボットが，関節角（ローカルな姿勢）のみならずグローバルな運動（具体的には，例えば，グローバル座標系上での上体の位置・姿勢の運動）も含めて理想目標歩容の運動に正確に追従している状態．実床反力パターンも目標床反力パターンに一致することになる．なお，ここで「状態」は，瞬間状態を意味する場合もあるが，時系列や長期的なパターンを意味する場合もある.

【両脚間たわみ角】
支持脚足部柔軟構造のたわみと遊脚足部柔軟構造のたわみとに起因する，目標支持脚 COP に対応する支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する遊脚足部の点とを結ぶ線分の傾斜角の変化量.

【両脚間床傾斜角偏差】
実際の両脚間床傾斜角（目標支持脚 COP に対応する実支持脚足部の点と目標遊脚 COP に対応する実遊脚足部の点を結んだ線分の傾斜角）と目標歩容を生成する際に想定した両脚間床傾斜角との差．ただし，想定両脚間床傾斜は，両脚支持期では，目標支持脚 COP と目標遊脚 COP を結んだ線分の傾斜角である.

【両脚コンプライアンス動作】

目標支持脚/遊脚 COP が目標 ZMP を中心にベクトル$\boldsymbol{V}$まわりに両脚コンプライアンス角だけ回転（公転）するように，目標支持脚/遊脚足部を平行移動させる動作．(8.6 節)

---------- ワ行 ----------

参考文献

参考文献

[1] M. Vukobratovi´c and J. Stepanenko, "On the Stability of Anthropomorphic Systems", Mathematical Biosciences, Vol.15, Oct., p.1-37, 1972.

[2] 高西,石田,山崎,加藤:"2足歩行ロボットWL-IORDによる動歩行の実現", 日本ロボット学会誌, vol.3, no.4, pp.325-336, 1985.

[3]三浦,下山:"竹馬方二足歩行ロボットの制御系" , 日本ロボット学会誌, vol.1, no.3, pp.176~181, 1983.

[4] S. Kajita, O. Matsumoto, and M. Saigo, "Real-time 3D Walking Pattern Generation for a Biped Robot with Telescopic Legs", Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, pp.2299-2036.

[5] M.H.Raibert, Legged Robot that Balance, MIT Press, 1986.

[6]T.McGeer:"Passive dynamic walking", The International Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62~82, April 1990.

[7]T.McGeer:"Passive walking with knees", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.3, pp.1640~1645, 1990.

[8] K. Nagasaka, Y. Kuroki, S. Suzuki, Y. Itoh, and J. Yamaguchi, "Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot", In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, 2004, pp. 3189-3194.

[9] K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "An Analytical Method on Real-time Gait Planning for a Humanoid Robot", Journal of Humanoid Robotics, vol.3, no.1, pp. 1-19, 2006.

[10] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "Online Generation of Humanoid Walking Motion based on a Fast generation Method of Motion Pattern that Follows Desired ZMP", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, pp. 2684-2689.

[11] R.Kurazume,T.Hasegawa and K.Yoneda, "The Sway Compensation Trajectory for a Bipeda Robot", Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automations, 2003, pp.925-931.

[12] T. Sugihara and Y. Nakamura, "Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots", IEEE Transaction on Robotics, vol.25, no.3, pp. 658-669, 2009.

[13] 山口, 高西, 加藤:"上体運動により 3 軸モーメントを補償する 2 足歩行ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.4, pp.581~586, 1993.

[14] 長阪, "動力学フィルタによる人間型ロボットの全身運動生成", 東京大学博士課程論文, 2000.

[15]K. Yamane and Y. Nakamura, "Dynamics Filter - Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures," IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.

19, no. 3, pp. 421-432, 2003.
[16]梶田, 金広, 金子, 藤原, 原田, 横井, 比留川:”分解運動量制御：運動量と角運動量に基づくヒューマノイドの全身運動生成”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.6, pp.772~779, 2004.
[16]梶田, 金広, 金子, 藤原, 原田, 横井, 比留川:”分解運動量制御：運動量と角運動量に基づくヒューマノイドの全身運動生成”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.6, pp.772~779, 2004.
[17] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point", Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003, pp. 1620-1626.
[18]佐野,古荘:”角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行”, 計測自動制御学会論文集, vol.26, no.4, pp.459~466, 1990.
[19]梶田,谷:”線形倒立振子モードを規範とする凹凸路面上の動的2足歩行制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.31, no.10, pp.1705~1714, 1995.
[20]長阪,稲葉,井上:”体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1793~1194, 1999.
[21] 重見, 河口, 吉池, 川辺, 小川:”新型ASIMOの開発”, Honda R&D Technical Review”, vol.18, no.1, pp.38~44, 2006.
[22] J.H. Park and Kyoung D. Kim, "Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control", Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, pp.3528-3533.
[23] T. Nagasaki, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi, K. Tanie, "A Running Experiment of Humanoid Biped", Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004, pp.136-141.
[24] R. Tajima, D. Honda and K. Suga, "Fast Running Experiments Involving a Humanoid Robot", IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009, pp.1571-1576
[25] O. Kwon and J.H. Park, "Gait Transitions for Walking and Running of Biped Robots", Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, September, 2003, pp. 1350-1355.
[26] Y. Fujimoto, "Trajectory Generation of Bipedal Running Robot with Minimum Energy Consumption", Proceedings of IEEE International Conference on Robots and Automation, 2004, pp 3803-3808.
[27] T. Sugihara and Y. Nakamura, "Enhancement of Boundary Condition Relaxation Method for 3D Hopping Motion Planning of Biped Robots", Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, San Diego, 2007, pp.444-449.

研究業績

学位請求に用いる定期刊行誌掲載原著論文

[1] 竹中, 松本, 吉池:”定常歩容に漸近する 2 脚ロボットの自在歩容生成”, 日本ロボット学会誌, vol.29, no.5, pp.455~462, 2011
[2] 竹中, 松本, 吉池, 城倉:”水平床反力限界を考慮した2脚ロボットの走行歩容生成”, 日本ロボット学会誌, vol.29, no.9, pp.849~856, 2011
[3] 竹中, 松本, 吉池:”床反力限界を考慮した 2 脚ロボットの動力学補償”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.3, pp.295~306, 2014

学位請求に用いる国際会議発表論文

[1] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike, “Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -1st Report: Walking Gait Pattern Generation-”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
[2] T. Takenaka, T. Matsumoto, T. Yoshiike, and S. Shirokura, “Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -2nd Report: Running Gait Pattern Generation-”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
[3] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike, “Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -3rd Report: Gait Pattern Modification to Compensate Approximated Dynamics Error-”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.
[4] T. Takenaka, T. Matsumoto, T. Yoshiike, T. Hasegawa, S. Shirokura, H. Kaneko, and A. Orita, “Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot -4th Report: Integrated Balance Control-”, In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009.

関連する受賞歴

[1]平成１６年　全国発明表彰　文部科学大臣発明賞，竹中　透(株)本田技術研究所，”二足歩行ロボットの大局的安定化制御方法の発明”，特許 3269852 号　（モデル ZMP 制御）

[2]日本ロボット学会　第２６回（２０１２年）学会誌論文賞，”水平床反力限界を考慮した 2 脚ロボットの走行歩容生成”，（日本ロボット学会誌　第 29 巻 第 9 号，pp.849-856），竹中　透，松本　隆志，吉池　孝英，城倉　信也（本田技術研究所）

関連する国内登録特許

[1] 竹中　透，”脚式移動ロボットの歩行制御装置”，特許 3148828，1992/4/30　（両脚コンプライアンス制御の原型）
[2] 竹中　透，五味　洋，”脚式移動ロボットの歩行制御装置”，特許 3148827，1992/4/30（足部柔軟構造）
[3] 竹中　透，”指定時刻到達関数発生器”，特許 3233450，1992/5/22　（指定時刻到達関数発生器．足部軌道生成に使用）
[4] 竹中　透，”脚式移動ロボットの姿勢安定化制御装置”，特許 3269852，1992/5/29　（モデル ZMP 制御）
[5] 竹中　透，松本　隆志，”脚式移動ロボットの歩容生成装置”，特許 3663034，1997/7/25（上体高さ決定法）
[6] 竹中　透,長谷川　忠明,松本　隆志,”脚式移動ロボットの姿勢制御装置”,特許 3672426，1997/12/19　（脚腕協調制御）
[7] 竹中　透，長谷川　忠明，松本　隆志，”脚式移動ロボットの制御装置”，特許 3629133，1998/1/30　（複合コンプライアンス制御）
[8] 竹中　透，長谷川　忠明，松本　隆志，”脚式移動ロボットの制御装置”，特許 3629142，1998/4/20　（全床反力の並進力成分のコンプライアンス制御）
[9] 竹中　透，長谷川　忠明，松本　隆志，”脚式移動ロボットの床形状推定装置”，特許 3634238，2000/5/19　（床形状推定）
[10] 竹中　透，松本　隆志，長谷川　忠明，”脚式移動ロボットの目標運動生成装置”，特許 3726032，2001/4/27　（歩行用フルモデル補正）
[11] 竹中　透，”脚式移動ロボットの歩容生成装置”，特許 3726081，2001/11/16　（自在歩行歩容生成）
[12] 竹中　透,松本　隆志,吉池　孝英,”脚式移動ロボットの歩容生成装置及び制御装置”，特許 3672102，2002/12/26　（走行自在歩容生成での鉛直運動生成）
[13] 竹中　透,松本　隆志,吉池　孝英,”脚式移動ロボットの歩容生成装置”,特許 3672100，2002/12/26　（走行自在歩容生成の基本特許．水平床反力許容範囲＋定常歩容）

［14］竹中　透，”制御システム”，特許 3837442，2002/12/26　（予測値に対するリミッター）

［15］竹中　透, 松本　隆志, 吉池　孝英,”脚式移動ロボットの歩容生成装置”, 特許 3679105, 2002/12/27　（走行フルモデル補正）

［16］竹中　透, 松本　隆志, 吉池　孝英, ” 脚式移動ロボットの制御装置”, 特許 4246638, 2003/1/20　（走行大局安定化制御）

［17］竹中　透, 松本　隆志, 吉池　孝英, ” 移動体の制御装置”, 特許 4126063, 2004/11/29（階層コンプライアンス制御）

［18］竹中　透, 松本　隆志, 吉池　孝英,”脚式移動ロボットの歩容生成装置”, 特許 4199236, 2004/6/28　（走行歩容生成でのスピンキャンセル）

［19］竹中　透，”移動ロボットの歩容生成装置”，特許 4800036，2005/1/5　（幾何学的写像部での擬似角運動量保存）