

二足歩行ロボットの走行歩容生成

Running Gait Generation for Biped Robot

竹 中 透*

Toru TAKENAKA

吉 池 孝 英*

Takahide YOSHIKE

松 本 隆 志*

Takashi MATSUMOTO

城 倉 信 也*

Shinya SHIROKURA

要 旨

二足歩行ロボットの走行速度を上げようとする、離床直前または着地直後にスリップやスピンの発生してバランスを崩しやすくなる。この問題を解決するために、動力学的な安定性を保証しつつスリップとスピンを抑制する歩容生成技術を開発した。この技術では、足底と床との間の摩擦力に、接地荷重の変化に対応して連続的に変化する許容範囲を設定し、この許容範囲を超過しないように上体の水平加速度、上体の曲げおよびひねりを調整する手法を用いている。またこの技術は、遅いジョギングのような接地荷重が完全にはゼロにならない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対しても、床摩擦力の許容範囲を変更するだけで統一的に適用できる。この技術を用いて ASIMO と同じサイズの実験機にて 10 km/h の走行を実現した。

ABSTRACT

An attempt to increase the running speed of a biped robot often results in a loss of balance due to slip and spin generated just before lifting or after landing its foot. In order to solve this issue, we developed the gait generation technology that assures dynamic stability while suppressing slip and spin by defining the allowable range of friction force between a sole and a floor. The range of the friction force changes according to the vertical ground reaction force, and is used to adjust the horizontal acceleration, bend, and twist of the robot's torso. By adjusting the range of the friction force, a uniform approach can be taken to generate various gaits such as walking on a floor with low friction coefficient, or slow jogging. Slow jogging is an intermediate motion between walking and running in which the vertical ground reaction force does not quite reach zero. The gait generation technology realizes a running speed of 10 km/h in an experimental robot of the same size as ASIMO.

1. まえがき

Honda は、人と共存、協調し、社会の中で役に立つことにより、新しい価値をもたらすヒューマノイドロボットの研究をおこなってきた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。移動機能に関しては、人の移動に追従するための高速な移動能力、人が急に飛び出してくるような状況に俊敏に対応する能力を向上させる上で、走行の研究が重要である。

走行は、空中で移動することによって歩行よりも大きな歩幅をとることができるため、高速な移動に有利である。さらに上体の上下運動の最下点近辺で自重の2倍程度の接地荷重が発生し、床摩擦力の限界が高くなるので、急峻な加減速が可能となり、状況変化へ俊敏に対応しやすい。

Honda は、2004 年に ASIMO で 3 km/h の直線走行、2005 年に 6 km/h の直線走行と 5 km/h の旋回走行を発表した [Fig. 1(a), (b)]⁽³⁾。その後も研究を重ね、ASIMO と



(a) Running (6 km/h)



(b) Running in circular pattern (5 km/h)

Fig. 1 Running posture of ASIMO

同じサイズの実験機にて 10 km/h 走行を実現した。

本稿では、これらの走行の実現にあたって核となった歩容生成技術について述べる。

2. ZMP 規範歩容生成

二足歩行ロボットの歩行制御の一般的な手法のひとつに、目標歩容を生成しこれに実際のロボットを追従させる手法があり、Honda のロボットもこの手法を採用している。目標歩容は、ロボットの関節角度を決定するために必要となる足先の軌道、上体の位置および姿勢の軌道によって記述される。この目標歩容の生成では、動力学的な安定性の保証が重要となる。

この安定性の保証に対して、Zero Moment Point (ZMP) という概念が提唱されている⁽⁴⁾。ロボットが歩容に基づいて運動した場合の慣性力と重力の合力を総慣性力と呼び、その総慣性力を作るモーメント(厳密には鉛直軸回りの成分を除く)がゼロとなる床面上の点が ZMP である (Fig. 2)。ロボットが動力学的に安定であるためには、ZMP は、片脚支

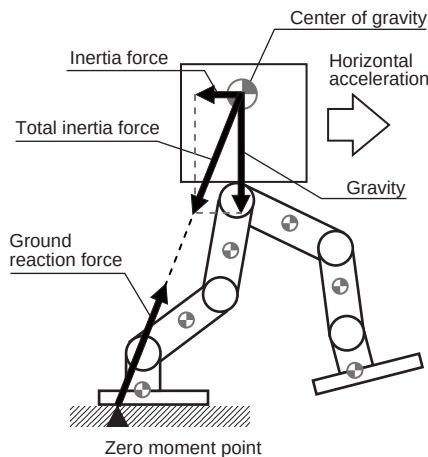


Fig. 2 Zero Moment Point (ZMP)

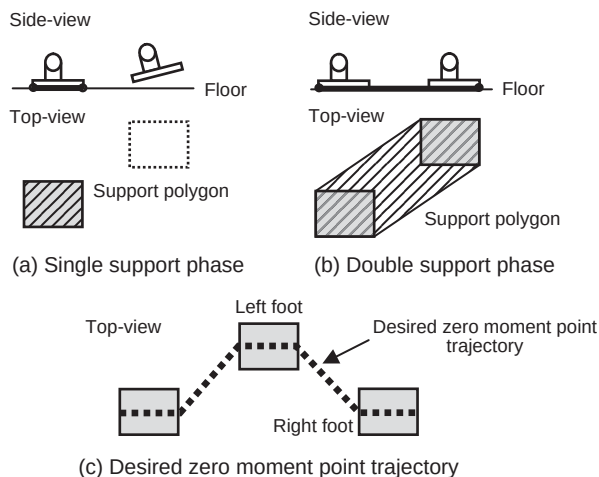


Fig. 3 Desired zero moment point trajectory

持期には支持脚の接地面の中 [Fig. 3(a) 斜線領域] に、両脚支持期には両脚の接地面の包絡線の中 [Fig. 3(b) 斜線領域] に存在しなければならない。この範囲を逸脱した場合には、接地性が保証されなくなり転倒する可能性がある。

ZMP 規範歩容生成手法は、目標 ZMP の軌道を上記条件を満足するように設定し、この軌道を実現するように目標歩容を生成する手法である。この手法では (Fig. 4)、まず歩幅と歩行周期のパラメータを設定し、そのパラメータ

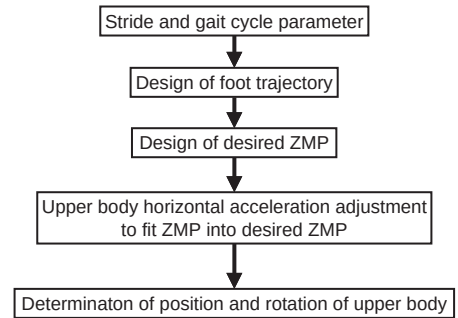
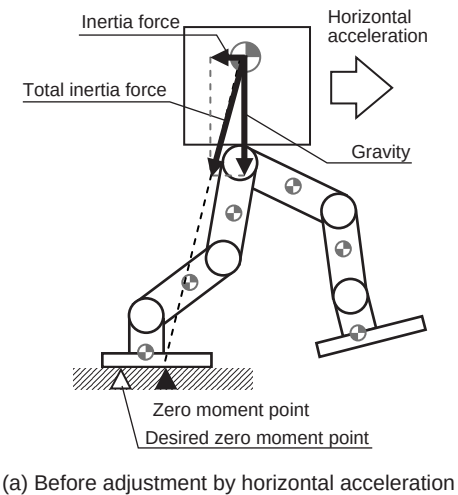
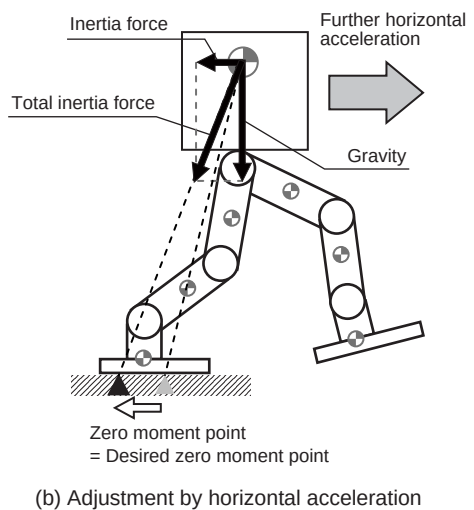


Fig. 4 Flow of ZMP based walking gait determination



(a) Before adjustment by horizontal acceleration



(b) Adjustment by horizontal acceleration

Fig. 5 Balancing motion via upper body horizontal acceleration

を基に足先の軌道を決定する。次に目標 ZMP の軌道を安定な範囲内に設定する。具体的には、目標 ZMP が、踏み出した足(前足)が床に着く瞬間から後ろ足を上げる瞬間までに、後ろ足のつま先から前足のかかとに移動し、片脚支持期にかかとかからつま先に移動するように軌道を設定する [Fig. 3(c)]。

次に、運動から計算される ZMP を目標 ZMP に一致させるように、ロボットの上体の水平加速度を決定する。これは総慣性力によって目標 ZMP 回りに発生するモーメントをゼロにすることである。例えば Fig. 5(a) に示すように運動から計算される ZMP が目標 ZMP よりも前にあった場合、ロボットの目標歩容の上体位置をさらに前に加速し、運動から計算される ZMP を後ろに移動させ、目標 ZMP 回りのモーメントをゼロにする [Fig. 5(b)]。

最後に上体の水平加速度を 2 回積分し、上体の水平位置を得る。この時、上体姿勢は、あらかじめ決定しておいた姿勢(たとえば直立姿勢)にする。以上の手順によって、安定性を保証された歩容が生成される。

この ZMP 規範歩容生成手法においては、全体重心の水平加速度は従属的に決定され、これに釣り合う床反力の水平成分も従属的に決定される。

3. 従来技術の問題点

走行時の歩容を生成する際には、空中期において、床反力がゼロとなる運動を生成しなければならない。したがって、従属的に床反力が決定されてしまう ZMP 規範歩容生成手法は、走行歩容の生成には適用できない。

この問題に対して、空中期と接地期との境界で運動拘束条件を切り換えながら歩容を生成する手法が提案されている⁽⁵⁾。空中期では、重心が放物線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、ロボットの位置と姿勢が決定される。一方、接地期では、ZMP 規範歩容生成手法によってロボットの位置と姿勢が決定される。

この手法を用いれば、空中期での床反力をゼロにする歩

容を生成できる。しかし、離床直前や着地直後での接地荷重の小さい期間(Fig. 6 斜線部分)において、従属的に決定された床反力の水平成分が床摩擦力の限界を超え、スリップやスピンの発生する恐れがある。スリップは前後方向の転倒を発生させる原因となる。スピンは単に直進性を低下させるだけでなく、着地位置が左右にずれることと、高速走行時に過大な遠心力が発生することにより、左右方向の転倒の原因となる。

また、常にいずれかの脚が接地している遅いジョギングでは、接地荷重がゼロとならず空中期が存在しないので、切り替えの手法は適用できない。一方、ZMP 規範歩容生成手法を全期間で用いると、接地荷重の小さい両脚支持期においても(Fig. 6)、スリップやスピンによる転倒の可能性が残る。

4. 走行歩容生成

前章で述べた問題を解決するために、接地荷重の変化に対応して連続的に変化する摩擦力の許容範囲を設定し、これを基にスリップやスピンを抑える歩容生成手法を開発した。この手法により、離床直前や着地直後の動力学的な安定性を保証でき、さらに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おいても、統一的に歩容を生成できる。以下にその歩容生成手法を紹介する。

4.1. 床反力の水平成分を考慮した上体軌道生成

接地期においては、目標 ZMP の軌道を、従来の ZMP 規範歩容生成手法と同様に設定する。空中期においては、床反力は発生しないので、総慣性力がゼロとなり、任意の作用点回りの並進力とモーメントがゼロとなる。その結果目標 ZMP とは無関係に運動が生成される。したがって、目標 ZMP は任意の場所に置いてよいが、接地期との連続性を保つため、仮想的に次の着地位置に連続的に移動するように設定する。

Fig. 7 に走行時の上体の位置と姿勢(鉛直軸回りの成分を除く)の軌道の生成フローを示す。まず、空中期の時間、接地期の時間、および着地瞬間での目標重心高さから接地荷重のパターンを設計する(Fig. 8)。次に、この接地荷重から床反力の水平成分の許容範囲を設定する(Fig. 9 細線)。

歩行の場合と同じく、目標 ZMP 回りのモーメントをゼロにするように、目標歩容の上体の水平加速度を調整する。この調整によって従属的に床反力の水平成分が得られる(Fig. 9 点線)。この床反力の水平成分が許容範囲内にあれば動力学的な安定性とスリップの回避の両者を保証する目標上体軌道となる。そうでない場合、上体の水平加速度を制限して、床反力の水平成分が許容範囲に収まるようにする(Fig. 9 太線)。ただし、この制限によって目標 ZMP 回りのモーメントがゼロであるという動力学的な安定条件が満

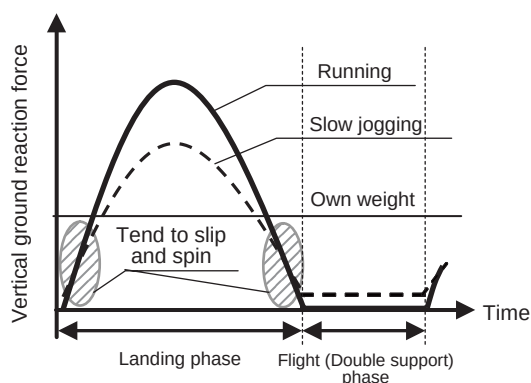


Fig. 6 Vertical ground reaction force of running and slow jogging

たされなくなる。そこでロボット全体の重心加速度の水平成分を変化させないようにしながら、上体を回転させる(曲げる)ことでロボットの重心回りの角運動量変化率を変化させて、動力的な安定性を満たす(Fig. 10)。この上体の回転により、総慣性力の作用点がずれるのと同じ効果が生じ、ZMP 回りのモーメントをゼロにできる。

上体の水平加速度の調整と上体の回転による補償によって、動力的な安定条件は満足される。しかし上体の回転による補償では、床反力の水平成分の制限によって上体回転加速度を修正するので、時間的な積分により上体姿勢が発散してしまう。実際のロボットでは上体を無限には回せないで、実現不可能な歩容となる。そこで接地荷重が大きい時期に、上体姿勢を復元させる。

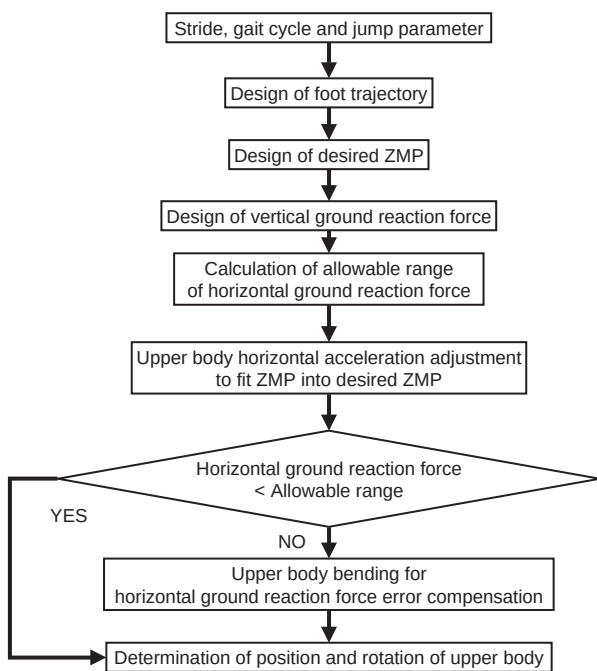


Fig. 7 Flow of running gait determination

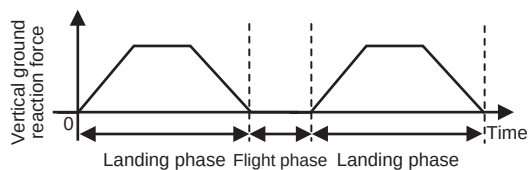


Fig. 8 Vertical ground reaction force

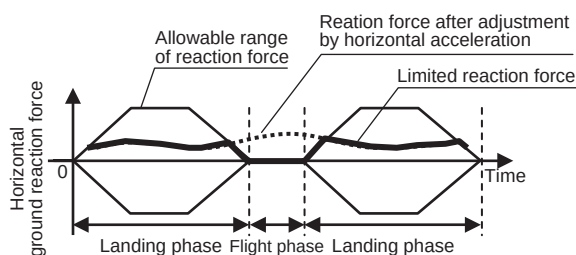


Fig. 9 Distribution of horizontal force

4.2. 上体の鉛直軸回りの回転軌道生成

目標歩容の床反力ヨーモーメントが床摩擦力の限界を超えるとスピンが発生する。このヨーモーメントは、走行時や高速歩行時など、脚を高速に振り出す時に顕著になる。前述のように、スピンが発生すると力学的なバランスが崩れて転倒に至る可能性がある。これを防ぐため、接地荷重と床摩擦係数からヨーモーメントの許容範囲を設定し(Fig. 11)、その許容範囲を超える場合には上体の鉛直軸回りの回転(ひねり)によって補償し(Fig. 12)、鉛直軸回りの動力的な安定

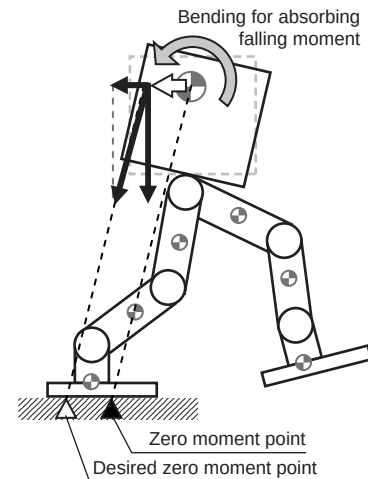


Fig. 10 Balancing motion via upper body bending

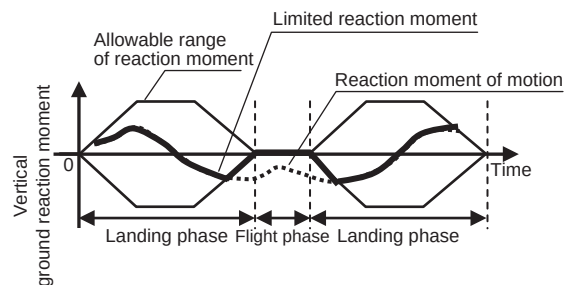


Fig. 11 Limit of vertical ground reaction moment

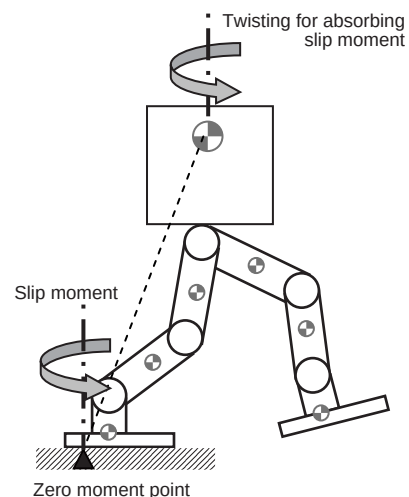


Fig. 12 Vertical moment control

性を満足させる。ただし、上体の鉛直軸回りの回転加速度を修正するので、前節での上体の位置と姿勢の軌道生成と同様、上体の鉛直軸回りの回転角度(ひねり角)が時間的な積分により発散してしまう。そこで接地荷重が大きい時期に、上体の鉛直軸回りの回転を復元させる。

本章で述べた手法により、離床直前や着地直後の動力学的な安定性を保証でき、さらに遅いジョギングにおいても、床摩擦力の許容範囲を変更するだけで、運動拘束条件の切り替えを必要とせず、統一的に歩容を生成できる。また、低摩擦係数の床に対しても、床摩擦力の許容範囲を小さくするだけで滑りにくい歩容が生成できる。

5. 歩容生成結果

ASIMOと同じ脚長の計算機シミュレーションモデルを用いて、10 km/h 走行の目標歩容生成を行った。歩幅は 730 mm、一步の周期は 0.26 s(空中期間 0.10 s, 接地期間 0.16 s)とした。Fig. 13に走行時の接地荷重設計値(a), 床反力の

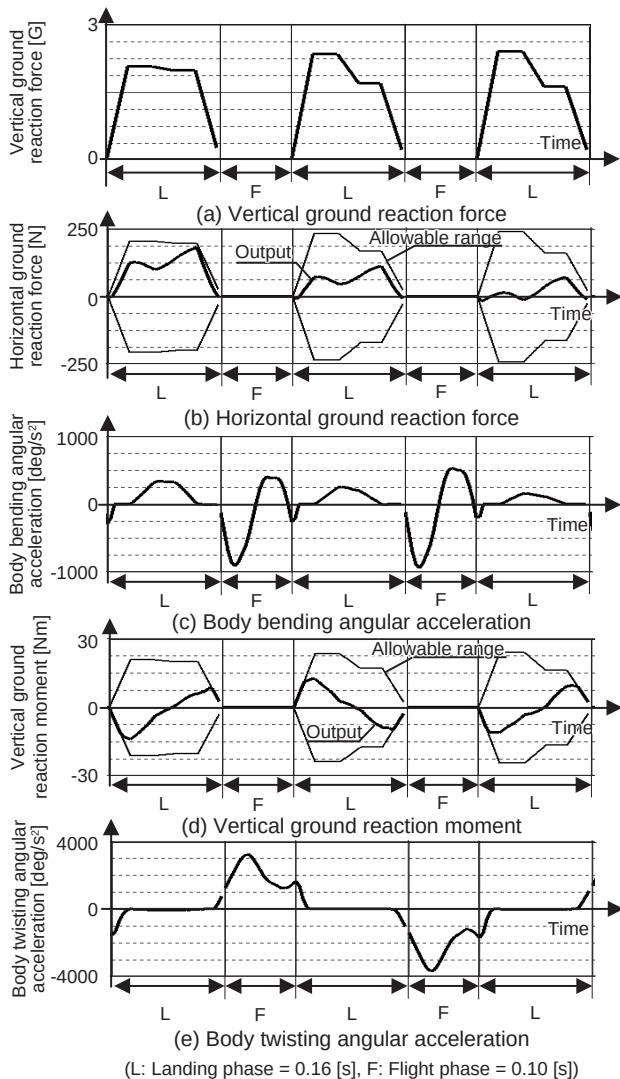


Fig. 13 Force and moment design at 10 km/h running

水平成分の許容範囲〔(b)細線〕と生成された歩容の床反力の水平成分〔(b)太線〕, 上体傾きの角加速度(c), ヨーモーメントの許容範囲〔(d)細線〕と生成された歩容のヨーモーメント〔(d)太線〕, 上体ひねりの角加速度(e)を示す。これらの図での最初の接地期は加速走行状態, その後の二回の接地期は 10 km/h での定常走行状態である。

Fig. 13(b), (c)に示すように, 生成された歩容の床反力の水平成分が許容範囲内に収まっている。許容範囲が絞られている空中期およびその近傍においては超過分を補償するための角加速度が発生し, 接地期の間に復元するための角加速度が発生している。

Fig. 13(d), (e)に示すように, 生成された歩容のヨーモーメントも許容範囲内に収まっている。許容範囲が絞られている空中期およびその近傍においては超過分を補償するための角加速度が発生している。この角加速度が左右交互に発生し打ち消しあうので, 復元するための角加速度はほぼゼロになっている。

以上の結果から, 動力学的な安定性を保証しつつ, 離床直前や着地直後のスリップとスピンを抑制する歩容が, 本手法によって生成できることが示された。

6. 走行実験

ASIMOと同じ脚長で, 脚の軽量化とアクチュエータの出力向上を施したロボットを用いて 10 km/h の走行実験をおこなった。ロボットは5章で生成した目標歩容に追従するように制御した。

実際のロボットでは, アクチュエータの追従能力, 機構的なたわみ等の影響で目標歩容に対する追従誤差が生じるため, 目標歩容によって要求された床反力が得られず, 力学的バランスを崩して, ロボットは傾斜してしまう。この傾斜によって転倒する可能性があるため, 接地期では, 床反力制御(いわゆるコンプライアンス制御)^{(1), (2)}をおこなって, 要求された床反力を発生させた。これに加えて, 接地期では,

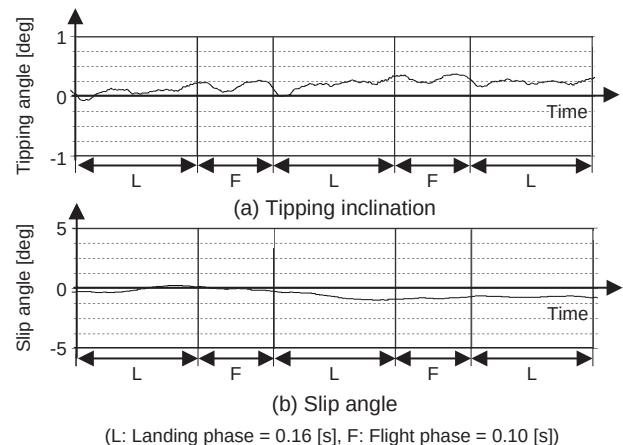


Fig. 14 Inclination error at 10 km/h running

ロボットの姿勢傾きにに応じて目標ZMPまわりに床反力モーメントを発生させ、ロボットの姿勢を安定化した。一方、空中期では、上体を重心回りに回転させることによる反動を用いて、ロボットの姿勢を安定化した⁽³⁾。

Fig. 14 (a) にロボットの傾斜角, Fig. 14 (b) にこの時のスピン角を示す。傾斜角はジャイロセンサと加速度センサからの推定値である。傾斜角は $\pm 0.4 \text{ deg}$ 以内に抑えられ、スピンに関しても $\pm 1 \text{ deg}$ 以内で抑えられており、離床直前や着地直後のスリップやスピンによる挙動の悪化もなく、安定した走行が実現できていることがわかる。

7. まとめ

二足歩行ロボットの歩容生成技術として、足底と床との間の摩擦力に、接地荷重の変化に対応して連続的に変化する許容範囲を設定し、この許容範囲を超過しないように上体の水平加速度、上体の曲げおよびひねりを調整する手法を開発した。この技術により、走行時に、動力学的な安定性を保証しつつ、離床直前や着地直後のスリップとスピンを抑制することが可能となった。またこの技術は、遅いジョギングのような接地荷重が完全にはゼロにならない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など、様々な歩行形態に対し、床摩擦力の許容範囲を変更するだけで統一的に適用できる。

この技術を用いて ASIMO と同じサイズの実験機にて 10 km/h の走行を実現した。

今後は、本技術をベースにさらなる運動能力の向上を図り、人が急に飛び出してくるような状況に俊敏に対応できるなど、人と共存、協調して、社会の中で役に立つロボットの実現を目指していく。

参考文献

- (1) Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y., Takenaka, T.: The Development of Honda Humanoid Robot, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, p.1321-1326(1998)
- (2) 広瀬真人, 竹中透: ヒューマノイドロボット ASIMO の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.1, p.1-6
- (3) 重見聡史, 河口裕一郎, 吉池孝英, 川邊浩司, 小川直秀: 新型ASIMOの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.18, No.1, p.38-44
- (4) Vukobratović, M., Stepanenko, Y.: On the Stability of Anthropomorphic Systems, Mathematical Biosciences, Vol.15, p.1-37(1972)
- (5) Raibert, M.: Legged Robots That Balance, The MIT Press, 233p.(1986)

■ 著 者 ■



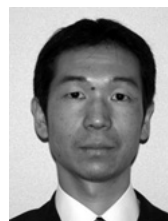
竹中 透



松本 隆志



吉池 孝英



城倉 信也