高速2足走行システム ACHIRES の開発

玉田 智樹^{*1*2} 五十嵐 渉^{*1} 米山大 揮^{*1*3} 田中和 仁^{*1*4}
 山川 雄司^{*1} 妹尾 拓^{*1} 石川 正俊^{*1}

Development of High-speed Bipedal Running Robot System (ACHIRES)

Tomoki Tamada^{*1*2}, Wataru Ikarashi^{*1}, Daiki Yoneyama^{*1*3}, Kazuhito Tanaka^{*1*4},
 Yuji Yamakawa^{*1}, Taku Senoo^{*1} and Masatoshi Ishikawa^{*1}

This paper presents a new method of realizing high-speed bipedal running with a high-speed robot using high-speed visual feedback. First, to achieve high-speed running with simple control, we developed a biped robot composed of lightweight high-torque actuators. Next we propose a control strategy which does not depend on typical methods based on a zero moment point, but instead modifies the robot's posture by high-speed visual feedback. In the strategy, by adding instantaneous high torque, we confirmed that the robot could execute running in the unbalanced region. We realized bipedal running at the speed corresponding to a Froude number of approximately 1.0, the highest reported value for non-birdlike bipedal robots.

Key Words: High-speed Bipedal Robot, High-speed Visual Feedback

1. はじめに

ロボットの移動形態の一つに多リンク構造による脚式ロボットがある。このようなロボットの利点としては、不整地などの障害物のある環境でも乗り越えることが可能で、かつ移動経路が連続である必要がないことなどが挙げられる。脚式ロボットの中でも、人間を模した関節構造による脚式の移動方法についての研究が多くなされている。このようなヒューマノイドロボットを扱うことは、人間と同じ構造を持つことによって人間が扱える動作をヒューマノイドにも似たようなアプローチで考察することができ、これまでの環境を変える必要がないなどの点で有利である。しかし、ヒューマノイドロボットの実現に必要な2足ロボットの脚式移動技術は、速度、エネルギー効率などの運動性能に関して現在十分に発展しているとは言い難い。

2足ロボットによる移動ではロボットと地面に固定された部

分がなく、床反力を考慮することでダイナミクスが複雑になり計算量が肥大化する傾向にある。最近ではGPUの性能向上やGPGPUなどの技術に伴い高速な計算を短時間で行うことが可能になってきているが、膨大な計算量を走行時にリアルタイムに行うことは困難である。そのため、簡易なアルゴリズムにするために、板バネで下腿部分を形成するなど特殊な機械的構造を用いているか、または運動上の制約を設けているロボットが多くみられる。Raibertらは、1980年代に2脚のホッピングロボットの走行動作の研究を行った[1]。このホッピングロボットは各脚に油圧式のアクチュエータと空気圧によるバネを備えている。Raibertらはホッピング動作の定常状態における足と体幹の軌道の対称性に基づく比較的単純な制御則によって走行を実現しており、Spring Loaded Inverted Pendulum モデル(SLIP) [2] で表されるように、リンクにバネ、ダンパが搭載された倒立振子の形をしており、2脚での走行動作を実現している。GrizzleらによるMABEL [3] は、最高速度11.0 [km/h] の安定した走行を実現した[4]。MABELは衝撃の吸収やエネルギーの保持を行うため、アクチュエータの動作を妨げないような一方向にのみ働く特殊な機構のバネを備えている。またケーブルによる差動機構を用いることですべてのモータを体幹部分に集約して脚部分の軽量化を行っている。これらのロボットは簡易な制御で走行を行うことが可能であるが、特殊な機構を用いており、制御アルゴリズムが汎用性を持っているとは言い難い。一方、汎用的なアルゴリズムとしてZMP規範の制御手法が挙げられる。この手法は従来多くの走行、歩行の研究分野に用

原稿受付 2014 年 12 月 23 日

^{*1}東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*2}現職：ソニー株式会社

^{*3}現職：株式会社本田技術研究所

^{*4}現職：トヨタ自動車株式会社

^{*1}Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{*2}Current Affiliation: Sony Corp.

^{*3}Current Affiliation: Honda R&D Co., Ltd.

^{*4}Current Affiliation: Toyota Motor Corp.

■ 本論文は提案性(要素分野)で評価されました。

■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

いられ、いくつかのヒューマノイドロボットによって実現されてきた。長阪らは小型のヒューマノイドロボット QRIO によりヒューマノイド型のロボットで初めて走行を実現した [5]。梶田らは 2 足ロボット HRP2-LR により人間大のサイズによるロボットでの走行を実現した [6]。HRP2-LR の走行速度は平均 0.58 [km/h] 程度と低速であったが、2005 年には本田技研工業の ASIMO でも走行が実現され、当時は 6 [km/h] であったが、2011 年には平均で 9 [km/h] の走行が可能な新型 ASIMO が発表された [7]。また、Tajima らは平均速度 7.0 [km/h] の走行を実現している [8]。これらのロボットは、歩行分野で用いられてきた ZMP (Zero Moment Point) [9] の概念に基づいて制御されている。

ZMP 規範の制御手法は、ロバスト性が高く比較的安定な歩行・走行を可能にするという長所を持つが、移動可能範囲を過度に限定しており、アクチュエータの性能に対して十分な走行速度を得ることは困難であり、また軌道生成のためのアルゴリズムが複雑になり、一般的に計算量が肥大化してしまう。

そこで本研究では、従来用いられてきた ZMP 規範の軌道生成方法から脱却し、軽量で高出力が可能なサーボモータで構成された汎用的な構造の 2 足ロボットを開発するとともに、高速画像処理によるフィードバック情報により転倒回避のための認識および行動を瞬間的に行うことで、簡易な軌道生成方法に基づいた高速 2 足走行を実現した。また、本手法によって ZMP 規範の軌道生成方法では考えることのできない不安定な領域における走行軌道の生成が可能になり、より高速な走行を実現できる展望を示した。

ロボット走行速度の比較尺度として McNeill [10] が提唱したフルード数 F がある。 $F \geq 1$ となることは、人間が実際に走行しか行えなくなる走行速度に到達することを意味する。その意味でも $F = 1$ に到達するか否かは従来から 2 足走行の速度面での目標値に掲げられてきた。本研究において 2 足ロボットは、フルード数に換算して約 $F = 1.0$ という値を実現し、高速な走行を実現した。

本論文では、2 章において本研究でのコンセプトを述べる。3 章では実際に開発した 2 足走行ロボットシステム “ACHIRES” について詳細な仕様を説明する。4 章において走行軌道の生成方法を述べる。5 章では実験結果を述べ、6 章で結論と今後の展望を述べる。

2. 本研究におけるコンセプト

本研究では、高速ビジョンと高速アクチュエータで構成した 2 足ロボットシステムを開発し、高速走行と転倒回避のための認識および行動を瞬間的に行う。以下に述べる 2 点を特徴とする 2 足走行を実現する。

- (1) 簡易な制御手法に基づいた高速 2 足走行の実現
- (2) ZMP 規範の手法から脱却し、より高速性に特化した制御手法による高速 2 足走行の実現

前章で述べたように、ZMP 規範の走行制御は、安定走行に特化した制御方法であり、高速な走行に適している制御とは言い難い。Fig. 1 に、接地相から跳躍相への遷移の様子を、ZMP 規範の制御と本研究での手法とで比較したものを示す。ZMP 規範

Fig. 1 The concept of this study

の制御では支持脚が地面と面接触であることを仮定し、接地面内のある領域内に ZMP が位置するように制御する。したがって、Fig. 1 の上半部においてロボットがある一定の傾きだけ前傾した場合、ZMP 制御により上記の前提を満たすためにロボットは後ろに引き戻されるように働きかけられると考えられ、前進方向の速度がこの動きにより相殺されてしまうことが起こりうると考えられる。

一方、本研究の提案手法では、高速動作するハードウェアを用いて、高速性に特化した動作戦略を用いる。高速に動作するロボットの姿勢変化の情報を高速画像処理でフィードバックし、空中相において素早く姿勢の回復動作を行うため、跳躍相において支持脚の足が地面と面接触しない不安定な状態を許容することが可能となる。したがって、ロボットの姿勢が前傾し過ぎた場合でも前進方向の速度を相殺することなく、前ステップで生じた前進方向の速度をスムーズに次ステップの跳躍に活かされ、高速な走行を実現できると考えられる。

前述したコンセプトに基づいて、本研究では高速 2 足走行ロボットシステム ACHIRES (Actively Coordinated High-speed Image-processing Running Experiment System) を構築した。次章でそのシステムの詳細について述べる。なお、走行軌道の生成法の体系化は今後の課題であり、本論文ではコンセプトを実証するために、高速ビジュアルフィードバックを用いた走行アルゴリズムの一例を提案する。

3. ACHIRES

本章では、ACHIRES を構成する高速 2 足ロボットと、高速ビジュアルフィードバックシステムについて述べる。これは 1ms 感覚運動統合システム [11] をベースとしたものであり、環境の変化に対する高い応答性を実現するための高速センサフィードバック構造と、多様な環境状態に対応して効率的に処理を行うためのリアルタイム制御システムを両立させたアーキテクチャを有している。これまでもこのようなアーキテクチャを持ったシステムより、高速な視覚フィードバックに基づくアプリケーションが実現されている [12] [13]。

ACHIRES は高速 2 足ロボット、高速ビジュアルフィードバ

Fig. 2 Outline view of ACHIRES

Table 1 Parameters of ACHIRES

Parameters	Value
Total Mass [kg]	0.80
Mass of Hip and Knee Motor [kg]	0.066
Mass of Ankle Motor [kg]	0.031
Length of upper limb link [m]	0.07
Length of lower limb link [m]	0.07
Length of upper body link [m]	0.07
Foot Length [m]	0.06

クシステムから構成されており、それぞれについて以下に説明する。

3.1 高速2足ロボット

本研究では、筆者らによって進められている高速多指ハンドに関する研究において開発した高速アクチュエータ技術[14]を活かし、2足ロボットに応用した。この高速アクチュエータのアプリケーションとして、人間の動作速度を超越した高速な物体操り動作に関する研究を実現している。本研究で関節に搭載するアクチュエータには俊敏で高速な運動を伝えることが求められるが、この要求を満たすモータとして、バックラッシレスかつ軽量のハーモニックドライブ減速機[®]をベースにした小型アクチュエータを本実験に用いる。本アクチュエータは従来の熱設計の見直しにより瞬時高出力が高くなるよう設計され、瞬時トルク/重量比に関して市販品の約3.5倍以上の能力を達成しており、180°の目標角度に対して0.1[s]の追従性を持つ。本研究で用いる2足ロボットの外観をFig. 2に、各パラメータをTable 1に示す。ロボットは各脚に三つのアクチュエータを持ち、人間の脚になぞらえ順に腰関節、膝関節、足首関節と呼ぶことにする。上体リンクは腰関節から上へ伸び、上肢リンクは腰関節、膝関節に、下肢リンクは膝関節、足首関節にそれぞれ接続される。足首関節の下には板状の剛なリンクを取り付け、つま先、踵に似せた構造とした。ロボットの全自由度は6自由度であり、全質量は800[g]と軽量に設計した。また足底は60×40[mm²]、 $t = 2$ [mm]のプラスチックプレートに、同じ面寸法をもつ $t = 3.5$ [mm]のゲル板を貼り合わせた構造をとった。

Table 2に各関節アクチュエータの仕様を示す。

3.2 高速カメラによるビジュアルフィードバック

本研究では高速に動作するロボットの姿勢変化の情報を高速

Table 2 Specification of ACHIRES

	Hip	Knee	Ankle
Reduction ratio	1/50	1/30	1/60
Instantaneous Maximum Torque [Nm]	3.85	2.5	1.3
Maximum Rotation Velocity [r/min]	200	200	167
Resolution Capability of Encoders [PPR]	100,000	60,000	48,000

画像処理によって取得し、両脚の運動にフィードバックする。本実験にはMikrotron社製の高速ビジョン(Eosens)を使用し、解像度1,280×700[pixel]の設定で600[fps]のフレームレートで画像取得が可能である。また、画像処理PCとカメラとのインタフェースにはCamera Link Fullを使用する。

画像情報をフィードバックしロボットを制御するリアルタイム制御コントローラとしてdSPACE社製モジュラシステムを使用した。このシステムは、汎用プロセッサと多数のI/Oを専用の高速バスによって接続することができ、画像情報処理、軌道計画、サーボ処理などの多様で複雑な計算を、1[ms]のサイクルタイムで実行する。

カメラは環境側に固定し、ロボットをベルトコンベア上で走行させ、走行中の位置、姿勢を計測する。具体的な計測対象は以下のとおりである。

ロボットが空中相、すなわち両脚が接地していない期間(詳細は4章を参照)において、

- (1) ロボット支持脚(地面に着地する脚)の位置座標
- (2) ロボットの角運動量、両脚と上体の姿勢

を画像情報から計測する。

(1)は空中相にあるロボットが接地相(詳細は4章を参照)に移行するための着地判定に用いる。(2)は空中相にあるロボットが姿勢の回復動作を行うために必要な情報であり、4.4節でその詳細を述べる。以上の特徴量はロボット左脚の膝関節と足首関節に反射材マーカを取り付け、その2点の位置を取得することで、各関節のエンコーダ値からロボット各関節の位置を計算することで導出する。反射材マーカの計測には、セルフウィンドウ法[15]を用いた。以下にそのアルゴリズムについて述べる。

画像1次モーメントを $M(1,0)$ 、 $M(0,1)$ 、0次モーメントを $M(0,0)$ とすると、

- (1) ある対象点を中心としてある一定範囲の矩形(ROI)内の $M(0,0)$ および $M(1,0)$ 、 $M(0,1)$ を計算する。
- (2) 計算したモーメントから画像上の重心位置 $(\bar{x}, \bar{y})$ を計算する。
- (3) 対象点の位置を $(\bar{x}, \bar{y})$ として更新する。
- (4) 上記の処理をフレームごとに行う。

画像のモーメント特徴量は、 (i, j) を画像平面上の位置として、

$$M(p, q) = \sum_{i,j} f(i, j) i^p j^q \quad (1)$$

で表される特徴量であり、重心位置 $(\bar{x}, \bar{y})$ は、

$$\bar{x} = \frac{M(1,0)}{M(0,0)}, \quad \bar{y} = \frac{M(0,1)}{M(0,0)} \quad (2)$$

で計算できる。ここで、 $f(i, j)$ は (i, j) における画素の輝度値を表しており、本実験では2値画像を用いているため、 $f(i, j) = 0$

Fig. 3 Overall system of ACHIRES

or 1 である。画像上でのマーカの運動よりもビジョンのフレームレートが十分に速ければ、フレーム間でのマーカの移動距離は小さいため、上記の処理でトラッキング可能である。また、画像の一部のみに対する重心演算であるため処理量も少なく、本実験でも 2 [ms] 以内にマーカ位置の更新が行えることを確認した。なお、サイクルタイムが 1 [ms] であるのに対して画像情報取得が 2 [ms] となっているが、サンプリングレートによってロボットの位置姿勢情報に生じる差分は、並進方向、回転方向ともに無視できる程度である。なお、取得した位置姿勢情報に付随するノイズは上記の誤差よりも小さいため、取得データに対するフィルタ処理は特に行っていない。

以上、3.1 節、3.2 節をまとめた ACHIRES の全体像を Fig. 3 に示す。

4. 走行軌道の生成

本研究では簡易な走行動作の生成方法として周期的な軌道パターンを用いる。走行はロボットの両脚が空中に浮いている時間があるという点で歩行と異なる。基本的には a ~ c の 3 相を繰り返すことで走行軌道を形成する。

- a 跳躍相
- b 空中相
- c 接地相

ただし、片脚が接地している期間を接地相、ロボットが跳躍を始めてから支持脚が地面を離れるまでの期間を跳躍相、両脚が地面から離れている期間を空中相と呼ぶこととする。本研究では走行軌道を上記の 3 相それぞれにおいて個別に指定する。各相の切り替えについて述べる。跳躍相から空中相、接地相から跳躍相への切り替えはある一定時刻を境界とし、その時刻は実験的に求めた。空中相から接地相への切り替えはビジョンによりロボット支持脚の位置座標を計測することで行う（詳細は 3 章を参照）。具体的には、支持脚の足首マーカの高さを取得し、ある一定の高さより小さくなれば着地判定を下す。以上を踏まえ、4.1 節において、各相で用いている制御手法とその根拠を述べる。

4.1 走行戦略の流れ

Fig. 4 に相の遷移と各相におけるそれぞれの関節に対する制御方法をまとめたものを示す。ただし、接地している脚を支持脚、離地している脚を遊脚と呼ぶ。両脚が宙に浮いている空中

Fig. 4 Phase transition and control methods of joints on each phase

PD ... Joint angle control by PD control,
ID ... Torque control by Inverse Dynamics,
VF ... Visual feedback control

相においては前方にある脚を支持脚、後方にある脚を遊脚と呼ぶ。Fig. 4 中の表は左から順に接地相、跳躍相、空中相の三つに対しそれぞれ支持脚、遊脚に対する制御方法を示す。

一般に、モータへの制御指令として

- (1) 関節角制御
- (2) トルク制御

がある。(1)の方法としては、本手法の 4.2 節で述べる PD 制御などが挙げられ、指令角に追従するまでトルクが加えられ続けるため、指令角付近にモータ角が追従する保証があるというメリットがある。そのため、各相の各関節の制御には PD 制御を用いている (4.2 節)。しかしながら、本手法の跳躍相において跳躍のために関節にトルクを付加するような場面においては、ロボットが跳躍するための加速度を得ることが目的であるため、各関節が目標角度に追従することを優先する (1)の方法よりも、おのおのの時刻において所望のトルク値が各関節に付加される (2)の方法を用いたほうが、その目的を達成するためには有効である。したがって、本実験での跳躍相における軌道生成においては、それぞれの関節に要求される挙動に応じて各手法のもつメリットが活かせるよう、各関節に対し以下のように制御方法を使い分けることとした (4.3 節)。

・腰関節 ... PD 制御による関節角制御

・膝関節、足首関節 ... 逆動力学 (ID) によるトルク制御

ただし、腰関節についてのみ、ロボット走行パターンの各ステップにおける再現性を優先したため、跳躍相において各時刻で所望の角度まで開脚することを目的とした。

本論文では、簡易な制御手法で走行を実現するため、安定性が保証される軌道を生成しているわけではない。そのため、各走行周期において発生するロボットの姿勢のずれを補正する必要がある。この操作を姿勢回復 (VF) と呼ぶことにする。ロボットは高速に動作するため、ロボットが接地している期間は非常に短い。したがって、接地時に姿勢回復動作を行うことは難しいと考え、空中相において腰関節を動作させることにより行うこととする。空中相において、3.2 節で述べた高速カメラを用いて取得した支持脚、遊脚、上体リンクの姿勢を基に計算した角度の分だけ、腰関節のアクチュエータを動作させることで支持脚、遊脚を動かし、空中でのロボットの姿勢回復を行う (4.4 節)。

4.2 PD 制御

アクチュエータの目標関節角度と現在の関節角度の間を線形

補間した軌道でつなぎ、時刻 t ($t_{st} \leq t \leq t_{ed}$) に沿って目標軌道を生成する。

$$\theta(t) = \theta(t_{st}) - \frac{\theta(t_{st}) - \theta(t_{ed})}{t_{ed} - t_{st}} \cdot t \quad (3)$$

式 (3) において、 t_{st} , t_{ed} は、それぞれの相の開始時刻、終了時刻を表し、 $\theta(t_{st})$, $\theta(t_{ed})$ は、それらの時刻における関節角度を表す。跳躍相において、支持脚の腰関節は $\theta(t_{st}) - \theta(t_{ed}) = (5/12)\pi$ [rad] だけ後方に振り、遊脚腰関節は逆に $-(5/12)\pi$ [rad] だけ前方に振り初期姿勢に戻る。接地相における支持脚膝関節は人間が跳躍のため膝を屈曲させるように、跳躍相に備えて $\theta(t_{st}) - \theta(t_{ed}) = \pi/6$ [rad] だけ膝を屈曲させる向きに動かし、跳躍相における遊脚膝関節は、接地相における支持脚膝関節の $\theta(t_{st})$ まで戻す。それ以外の膝関節は基本的に $\theta(t_{st}) = \theta(t_{ed})$ とする。支持脚、遊脚の足首関節については基本的に $\theta(t_{st}) = \theta(t_{ed})$ とする。また、 $t_{ed} - t_{st} = 0.075$ [s] とした。

ロボットは 4.4 節で後述する姿勢の回復動作を行う必要があるため、跳躍後最高点に達したとき、ロボットの腰関節角度も目標値まで到達していることが望ましい。したがって、ロボットの跳躍高さを $h = 0.02$ [m] としたとき、 $h = 0.02$ [m] まで上昇する時間と離地にかかる時間を足し合わせ、かつアクチュエータの定格出力での位置追従性能を考慮し、 $\theta(t_{st}) - \theta(t_{ed}) = (5/12)\pi$ [rad], $t_{ed} - t_{st} = 0.075$ [s] と設定した。また、上記の初期姿勢と跳躍高さについては、事前実験としてロボット上体と膝関節をある初期姿勢に設定し両足が接地している静止状態から、膝関節と足首関節にアクチュエータが耐えうる時間だけ瞬間最大トルクを付加してロボットの重心の跳躍高さを測定する跳躍実験を行い、高さの平均が最も大きかったときの初期姿勢、跳躍高さと同じ値を使用した。

以上のように各時刻に対する各関節の目標角度 θ^* を導出したのち、PD 制御で必要なトルク τ^* を計算する。

$$\tau^* = k_p(\theta^* - \theta) + k_d(\dot{\theta}^* - \dot{\theta}) \quad (4)$$

ただし、 k_p , k_d は比例ゲインと微分ゲインを表し、それぞれ実験的に求める。

4.3 逆動力学による制御

跳躍相において、一定時間を要し一定の高さだけ跳躍するために必要なトルクをシミュレーションより導出した。シミュレーションの流れを以下に示す。

- (1) ロボット重心の速度軌道を五次補間軌道により与える。
- (2) 与えた軌道に対して各関節角速度を求める。
- (3) 角速度より角度、角加速度を導出し、Fig. 5 のモデルを使用して逆動力学 (式 (11)) により各関節に加えるトルクを求める。

Fig. 5 にシミュレーションに使用した力学モデルを示す。本実験に用いた 2 足ロボットは、膝アクチュエータが人間同様の関節可動範囲を確保するため前方に突き出た機構を持つため、その機構を反映したモデルとした。

(1) については時間軸に対する速度の x 成分、 z 成分をそれぞれ

Fig. 5 The simulation model for inducing knee and ankle torque

$$v_x = -\beta t \quad (5)$$

$$v_z = \sum_{n=0}^5 \alpha_n t^n \quad (6)$$

とし、 v_z の境界条件として

$$\begin{aligned} v_z(t_s) &= 0, \quad \frac{d}{dt}v_z(t_s) = 0, \quad \frac{d^2}{dt^2}v_z(t_s) = 0, \\ v_z(t_e) &= \sqrt{2gh}, \quad \frac{d}{dt}v_z(t_e) = g, \quad \frac{d^2}{dt^2}v_z(t_e) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

となるように α_n ($n = 0, \dots, 5$) と β を定めた。ただし、跳躍開始時を $t_s = 0.0$ [s]、離地直前時を $t_e = 0.03$ [s] とし、跳躍高さ $h = 0.02$ [m] とした。跳躍相開始時から上体の姿勢が変化しないと仮定すると、支持脚が離地する時点で遊脚のつま先の y 座標が最下点を通過する直前の状態にあれば、少なくとも空中時の脚の入れ替えにおいてロボットが躓きを起こし転倒する可能性はないと考えられる。そこで、跳躍相において遊脚が後方から前へ振り出されるときに最下点直前まで移動するための時間を基に、 $t = 0.03$ [s] を離地直前時の時間に設定した。

以上のパラメータを用いて、式 (5) における β は評価関数にアクチュエータの拘束条件を加味して、最大値を求めることで決定した。 α_n は、離地直前ではロボットの鉛直方向上向きの加速度の絶対値が重力加速度と同等になっていること、初速度は高さ $h = 0.02$ [m] のときに鉛直方向上向きの速度が 0 となっていることに基づいて拘束条件を設定し、式 (7) の拘束条件から五次補間を行うことで導出した。

Fig. 5 において、 $\dot{q}_1$ を既知とすれば $\dot{\mathbf{q}} = (\dot{q}_2, \dot{q}_3)$, $\mathbf{v} = (v_x, v_z)$ とし、ヤコビアン $\mathbf{J}$ を用いて、

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{v} \quad (8)$$

とかける。(2) では (1) で設定した v_x, v_z の軌道を基に、 $\mathbf{J}$ の逆行列を掛けることにより角速度 $\dot{q}_2, \dot{q}_3$ が導出できる。なお、ここでは跳躍動作 (地面から足先が離れる直前まで) の間上体姿勢が一定であると仮定し、 $\dot{q}_1$ を定数 $\dot{q}_1 = 0$ とした。

(3) では (2) で求めた角速度より角度、角加速度を用いて逆

Fig. 6 Knee and ankle torques versus time

動力学を解くことにより、各関節に加えるべきトルクを求める。ラグランジュ法により運動方程式を導出する。すなわち、ロボットのリンク i の運動エネルギーを T_i 、位置エネルギーを U_i とすると、ラグランジュ関数 L は、

$$L = \sum_{i=1}^3 T_i - \sum_{i=1}^3 U_i \quad (9)$$

とかけ、各関節にかかるトルク τ_i は、

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad (10)$$

で求まる。したがって、これを整理し、各リンクに関するラグランジュの運動方程式を行列の形にまとめると以下ようになる。

$$M(q)\ddot{q} + C(\dot{q}, q) + g(q) = \tau \quad (11)$$

ただし、 $M(q)$ は慣性行列、 $C(\dot{q}, q)$ は求心力とコリオリの項、 $g(q)$ は重力項とする。そのうち、 t_e での膝関節トルク値 τ_2 が本実験に用いているアクチュエータの出力の上限になるよう v_x , v_z を設定し、膝トルク τ_2 と足首トルク τ_3 に関する部分についてプロットしたものを Fig. 6 に示す。

したがって、この膝トルク τ_2 と足首トルク τ_3 を指令値として各関節に与えれば、所望の重心の速度軌道に従ってロボットが動作すると考えられる。なお、軌道生成方法を簡易化するという目的から、膝関節には $t = 0.025 \sim 0.035$ [s] で一定値 2.5 [Nm] となるトルク入力、足首関節には $t = 0.01 \sim 0.02$ [s] で一定値 -0.7 [Nm] となるトルク入力を設定した。

4.4 空中相における姿勢回復制御

本研究では走行中のロボットにおける姿勢の制御を、姿勢を回復するために十分な時間がありかつ床反力の働かない空中相において行う。高速カメラによりリアルタイムフィードバックした各リンクの姿勢情報を基に回復動作のための各パラメータを求める。姿勢回復の流れを以下に述べる。

Fig. 7 に示すように、空中相におけるロボットを胴体部分と脚部分の 2 リンク構造として簡易モデル化する。胴体リンク、脚リンクの重心まわりの慣性モーメントを I_b , I_ℓ とし、各リンクの鉛直軸とのなす角度をそれぞれ ϕ_b , ϕ_ℓ とする。簡単のため、ロボットの重心が回転軸に一致しているという前提の下、

Fig. 7 2-link-structure model for recovery

空中相における角運動量保存則を考えると、

$$L_0 = I_b \omega_b + I_\ell \omega_\ell \quad (12)$$

が成り立つ。ただし、空中相開始時のロボット全体の角運動量を L_0 、 $\omega_b = \dot{\phi}_b$ 、 $\omega_\ell = \dot{\phi}_\ell$ とし、右式において非線形項は考えないものとする。ここで、空中相開始時刻を $t = 0$ とし、式 (12) の両辺を時刻 $t = 0$ から $t = T$ まで積分すると、

$$L_0 T = \int_0^T I_b \omega_b dt + \int_0^T I_\ell \omega_\ell dt \quad (13)$$

であり、 I_b , I_ℓ が $t = 0$ から $t = T$ まで一定値と近似してよいとし、 $\Delta\theta_b = \int_0^T \omega_b dt$, $\Delta\theta_\ell = \int_0^T \omega_\ell dt$ と定義すると、

$$L_0 T = I_b \Delta\theta_b + I_\ell \Delta\theta_\ell \quad (14)$$

と記述できる。ここで、胴体からの脚の角度を ϕ_ℓ 、すなわち $\phi_\ell = \theta_b - \theta_\ell$ とすると、式 (14) より、

$$\Delta\theta_b = \frac{I_\ell}{I_b + I_\ell} \Delta\phi_\ell + \frac{L_0 T}{I_b + I_\ell} \quad (15)$$

と求まる。したがって、空中相において存在する進行方向に転倒する向きの変位 θ_b を、 $\Delta\phi_\ell$ だけ脚を動かすことで、 $\Delta\theta_b$ だけ修正することができる。

5. 実験結果

3 章の 2 足走行ロボットシステムと 4 章の走行軌道方法を用いて走行実験を行った。その実験結果を Fig. 9 に示す。また、Web より動画を見ることができる [16]。ACHIRES は定常時での速度 4.2 [km/h] で最長で 60 歩、およそ 10 [s] の走行を実現した。この歩数を基準として、転倒するまでの歩数が 55 ~ 60 歩の範囲にあった場合の実験を「成功」と定義し、20 回の実験に対して ACHIRES は約 6 割の成功率を達成した。失敗の原因としてはケーブルによる物理的な干渉や、空中相において腰関節目標値への追従が遅れ前転方向の傾きを回復しきれず足が目標よりも後方にある状態で着地してしまい、次の跳躍で転倒すること等が主な原因として挙げられる。

Fig. 8 は各相における、Fig. 9 に記載した時刻に対応した、支持脚のつま先、踵の鉛直方向の座標を表している。離散値を

Fig. 8 Value change of height of right/left toes and heels. Black solid line ... Left toe, Black dotted line ... Right toe, Gray solid line ... Left heel, Gray dotted line ... Right heel, Light gray solid line ... Transition of phases (0.09 ... Jump phase, 0.1 ... Aerial phase, 0.13 ... Touchdown phase)

Table 3 Froude numbers of bipedal robots

Biped Robots	Froude Number
MABEL(University of Michigan) [3]	0.96
ACHIRES	0.996

示している灰色実線は、時刻に対する各相の遷移を表す。例えば、ロボットは 13.50 [s] から跳躍相を開始し、13.57 [s] から空中相へ移行したのち、13.67 [s] から接地相へ移行していることが分かる。13.5 [s] の直後で左脚踵の値（図中灰色実線）が、右脚踵の値（図中灰色破線）よりも大きいように、各ステップ周期において接地相、特に跳躍相において支持脚のつま先の高さが踵のそれよりも低くなっており、ロボットがつま先立ち状態で跳躍を行っていることを意味する。このことは、ZMP を規範とした制御から脱却し比較的不安定な状態を許容する本研究での提案手法を明確に反映している。

走行速度の評価として、無次元数であるフルード数 F を指標として用いる。

$$F = \frac{v_{avg}}{\sqrt{\ell \cdot g}} \quad (16)$$

ここで、 ℓ はロボットの脚長、 v_{avg} はロボットが達成した平均速度、 g は重力加速度を表す。実験では、平均速度 4.2 [km/h]、フルード数に換算して約 $F = 1.0$ という値を実現し、高速な走行を実現した。先行研究 MABEL との比較を、Table 3 にまとめる。

6. 結 論

本研究では、計算量や制御などのソフトウェア面や、モータの出力などのハードウェアの面でこれまで実現が難しいと考えられてきた高速 2 足走行を、高速アクチュエータと高速画像処理を組み合わせた 2 足走行ロボットシステム “ACHIRES” を構築し、簡易な軌道生成方法を提案することにより実現した。特に本研究では、高速画像処理によるフィードバック情報により転倒回避のための認識および行動を瞬間的に行うことで、従来の ZMP 規範の走行制御方法から脱却したまったく新しい軌道

Fig. 9 Sequence of photographs

生成方法で高速な走行を実現した。

本実験において 2 足ロボットは、平均走行速度 4.2 [km/h] を達成し、フルード数に換算して約 $F = 1.0$ という、現行の 2 足走行の分野ではトップクラスの高速走行を実現した。今回、環境側にカメラを固定して画像を取得する方法を採用したが、今後ロボット自体にカメラを取り付け、より広い範囲を走行できる自立走行型ロボットシステムを構築することや、地形の変化を走行軌道にフィードバックすることなどが考えられる。これにより自立型不整地走行ロボットといった、産業分野はもちろん災害救助等にも応用可能な、より実用的なロボット開発への展望が開けると考える。

参 考 文 献

- [1] M.H. Raibert: Legged Robots That Balance. The MIT Press,

1985.

- [2] R. Blickhan: "THE SPRING-MASS MODEL FOR RUNNING AND HOPPING," Journal of Biomechanics, vol.22, no.11/12, pp.1217-1227, 1989.
- [3] JW Grizzle, J. Hurst, B. Morris, H.W. Park and K. Sreenath: "MABEL, a new robotic bipedal walker and runner", Proc. IEEE American Control Conference, pp. 2030-2036, 2009.
- [4] K. Sreenath, H.-W. Park and J. W. Grizzle: "Design and Experimental Implementation of a Compliant Hybrid Zero Dynamics Controller with Active Force Control for Running on MABEL," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 51-56, 2012.
- [5] 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", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3189-3194, 2004.
- [6] T. Nagasaki, S. Kajita, K. Kaneko, K. Yokoi and K. Tanie: "A running experiment of humanoid biped," Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.136-141, 2004.
- [7] Honda—asimo, <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [8] R. Tajima, D. Honda and K. Suga: "Fast running experiments involving a humanoid robot," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1571-1576, 2009.
- [9] M. Vukobratović and B. Borovac: "ZERO-MOMENT POINT - THIRTY FIVE YEARS OF ITS LIFE", Int. Journal of Humanoid Robotics, vol.1, no.1, pp.157-173, 2004.
- [10] R. Alexander: Principles of Animal Locomotion. Princeton University Press, 2006.
- [11] 並木明夫, 石川正俊: "高速視覚と多指ハンドアームを有する実時間感覚運動統合システム", 第 4 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.109-110, 2003.
- [12] 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: "高速センサフィードバックに基づく把握行動", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.7, pp.707-716, 2002.
- [13] A. Namiki, T. Komuro and M. Ishikawa: "High-speed Sensory-motor Fusion for Robotic Grasping," Measurement Science and Technology, vol.13, pp.1767-1778, 2002.
- [14] 並木明夫, 石川正俊, 金子真, 亀田博, 小山順二: "軽量高速多指ロボットハンドの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-1F-G3, 2003.
- [15] 石井抱, 石川正俊: "1ms ビジュアルフィードバックシステムのための高速対象追跡アルゴリズム", 日本ロボット学会誌, vol.17, no.2, pp.195-201, 1999.
- [16] Ishikawa Watanabe Laboratory: ACHIRES: Bipedal Running Using High-speed Visual Feedback, <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/BipedalRunning/index-j.html>, <http://www.youtube.com/watch?v=n0xRcFqwnCM>, Running Progress—The History of Project ACHIRES—, <http://www.youtube.com/watch?v=rkB87epAFWk>

玉田智樹 (Tomoki Tamada)

2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻修士課程修了。在学中は 2 足ロボットの研究に従事。

五十嵐渉 (Wataru Ikarashi)

2013 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻修士課程修了。在学中は 2 足ロボットの研究に従事。

米山大揮 (Daiki Yoneyama)

2011 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。在学中は 2 足ロボットの研究に従事。

田中和仁 (Kazuhito Tanaka)

2010 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。在学中は 2 足ロボットの研究に従事。

山川雄司 (Yuji Yamakawa)

2006 年東京大学工学部機械工学科卒業。2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2008～2011 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2011 年同専攻博士課程修了。同年同研究科創造情報学専攻特任助教。2014 年同研究科システム情報学専攻助教。柔軟物体の高速マニピュレーション, 空調制御システムの解析・制御, 電動車いす入力装置の開発と制御, 高速高精度質量計測システムの開発などの研究に従事。博士 (情報理工学)。(日本ロボット学会正会員)

妹尾 拓 (Taku Senoo)

2003 年早稲田大学理工学部応用物理学卒業。2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2008 年同専攻博士課程修了。2005 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻特任助教。現在同研究科システム情報学専攻助教。ダイナミックマニピュレーション, 高速センサフィードバック制御, 2 足ロボットの研究に従事。博士 (情報理工学)。(日本ロボット学会正会員)

石川正俊 (Masatoshi Ishikawa)

1977 年東京大学工学部計数工学科卒業。1979 年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所入所。1989 年東京大学工学部計数工学科助教授。1999 年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻教授。現在東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002, 2003 年度東京大学総長特任補佐。2004 年度東京大学副学長。2005 年度東京大学理事・副学長。超並列・超高速ビジョン, センサフュージョン, ダイナミックイメージコントロール, メタ・パーセプションなどの研究に従事。1984, 2010 年計測自動制御学会論文賞, 1990 年応用物理学会光学論文賞, 1999 年櫻井健二郎氏記念賞, 2004 年計測自動制御学会技術賞友田賞, 2005 年応用物理学会光・電子集積技術業績賞 (林巖雄賞), 2011, 2013 年日本パーソナルリリティ学会論文賞, 2012 年島津賞, 2012 年服部報公賞, 1998, 2001, 2008, 2010, 2013 年本学会論文賞等受賞。2011 年紫綬褒章受章。計測自動制御学会, 電子情報通信学会フェロー。工学博士。(日本ロボット学会正会員・フェロー)