

人の角運動量補償動作を元とした人型ロボットの安定走行手法の開発

Development of stable running method of humanoid robot based on human's angular momentum compensation

2181006



研究代表者

早稲田大学

理工学総合研究所

次席 研究員
(研究院講師)

大谷 拓也

[研究の目的]

人型ロボットは人に近い形状であるため、ロボットを使えるように人が合わせるのではなく、人が働き生活するために人に合わせて設計された様々な環境に適合し活躍することが期待されている。しかし、人型ロボットは未だ人と同等の運動能力を持っていない。そこで、人の巧みな運動制御を取り入れることで、人型ロボットの運動能力を飛躍的に向上させ、人に合わせるができる人型ロボットを実現することが長期的に目指す姿である。

人と人型ロボットが様々な場面で協力して作業するには、ロボットに高い移動能力が必要であり、人型ロボットの移動能力向上に向けて歩行だけでなく走行動作生成手法の研究が進められている(長崎ら, 2003; Grizzleら, 2009; Martinら, 2017)。しかし、人のジョギングの速度が4 m/s程度であるのに対し、人型ロボットでは走行場所を完全に平坦な場所に限定しても、安定性の問題から3 m/sの走行が限界であり(竹中ら, 2011)、人型ロボットの実用化の障害となっている。この最大の原因は、既存の人間型ロボットの運動制御法は立脚中の脚の動きにのみ注目しているためであると考えられる。歩行に比べ走行は脚が地面に接していない時間を含むが、この空中期間に脚の動作で大きな角運動量が発生してしまうとロボットは回転

し転倒するため、空中におけるロボットの脚の動作を非常に小さく遅くしなければならない。これを解決するためには、脚だけでなく腕や体幹といった上半身を含む全身を用いた走行運動生成手法および、上半身を素早く動かさない既存のロボットではなく、脚と同程度の角運動量を発生可能な上半身を有する人型ロボットが必要となる。そこで本研究では、人の運動時の角運動量補償動作に基づく人型ロボットの安定走行手法の確立を目指す。

[研究の内容, 成果]

まず、本研究で用いる走行制御全体概要を説明する。大別すると以下の3つから成る。

- ・跳躍力を得る
- ・平行移動を制御する
- ・安定化を実現する

本研究では、我々がこれまでに開発している、跳躍力獲得・走行速度制御手法を用いる。跳躍力を得るためには立脚中に脚で地面を蹴る必要がある。人間が地面を蹴るには脚をばねのように動かし、弾性にエネルギーを蓄積しそのエネルギーを次のジャンプに用いる。この脚の弾性は、膝と足関節の弾性に由来する。そこで、ロボットモデルの膝と足関節を回転ばねとしてモデル化し、弾性を利用した蹴り出しを行う。着

地時の脚関節角度および関節弾性値を床反力が重心を通りやすいように設定することで、ある程度安定な蹴り出しを行わせる。また、平行移動を制御するには、多くの研究にて跳躍中に次の着地位置を制御する手法が取られている。そこで、現在の走行速度から、重心に対する足先着地位置を算出し、これを実現するよう股関節角度をコントロールする。

一般的な人型ロボットでは、跳躍中に制御を行わないため、跳躍期に大きく転倒するほどの外力を受けると、次の立脚期に修正が出来ない。跳躍中に制御を行うことは有効であると考えられるが、跳躍中の外乱、特に跳躍中に非常に大きく姿勢が崩れてしまうほどの外力を受けた場合に対応するには、従来のように体幹を用いるだけでなく、腕も能動的に動かし角運動量を発生させることが有効と考えられる。しかし、跳躍中に大きく上半身を用いた場合、その後着地した時点での状態が大きく異なってしまい、その後の立脚制御が困難になることが考えられる。特に、同方向に繰り返し外力を受ける場合には、各サイクルにおいて姿勢を復帰させられない場合、姿勢変化が積み重なり転倒につながる。そこで、走行の速度調整に主に用いる立脚以外の部位を安定化とその後の復帰動作を交互に行わせることで、各サイクルでロボットの Base フレーム姿勢だけでなく、安定化に用いる部位も復帰させることとした。

具体的には、跳躍中には、体幹・腕を用いて角運動量補償を行い遊脚を初期姿勢に戻し、立脚中には、上半身を初期姿勢に戻しながら、遊脚を用いて角運動量補償を行う（図1）。

はじめに目標角運動量決定部について説明する。ロボットの安定化に必要な角運動量を決定し、立脚以外の各部（体幹・両腕・遊脚）が発生すべき角運動量を決定する。ロボットの安定化に必要な角運動量 $\mathbf{L}^{required}$ は次のように決定した。

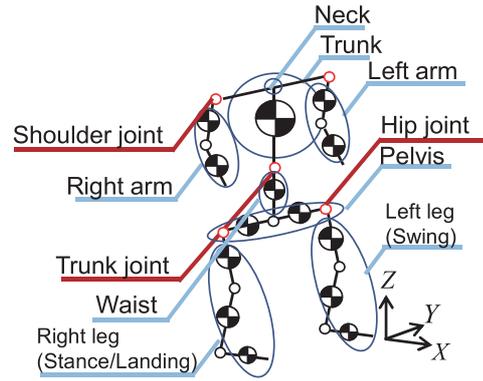


図1 人型ロボットモデル

$$\mathbf{L}^{required} = \begin{cases} 0 & (\text{stance phase}) \\ \mathbf{L}_{flight}^{required} & (\text{flight phase}) \end{cases} \quad 1$$

$$\mathbf{L}_{flight}^{required} = \mathbf{I}_{Base} \frac{(\varphi_{Base} - \varphi_{Base\text{target}})}{T} \quad 2$$

ここで、 $\mathbf{L}^{(3 \times 1)}$ は角運動量、 $\mathbf{I}_{Base}^{(3 \times 3)}$ はロボットベースリンクの慣性テンソル、 $\varphi_{Base}^{(3 \times 1)}$ はベースリンクの姿勢角度、 T は姿勢復帰時間である。式4-1にあるように、接地相においてはモデル全体の角運動量をゼロとなるようにし、空中相においてはベースリンクの姿勢を水平にするために必要な角運動量を $\mathbf{L}_{flight}^{required}$ として決定した。

姿勢の安定化に必要な角運動量が発生されるように体幹・両腕・遊脚で発生すべき目標角運動量 \mathbf{L}^{stab} は次のようになる。

$$\mathbf{L}^{stab} = \mathbf{L}^{required} - \mathbf{L} \quad 3$$

ロボットを構成するすべてのリンクによる全身の角運動量 \mathbf{L} は、各リンクの角運動量から次式のように求められる。

$$\mathbf{L} = \sum_{j=1}^{All\ link} \mathbf{L}_j \quad 4$$

\mathbf{L}_j は j 番目のリンクが原点回りに発生させる角運動量であり、次式のように与えられる。

$$\mathbf{L}_j = \mathbf{c}_j \times \mathbf{P}_j + \mathbf{R}_j^T \bar{\mathbf{I}}_j \mathbf{R}_j \boldsymbol{\omega}_j \quad 5$$

ここで、 \mathbf{c}_j は第 j リンクのワールド座標系における重心位置ベクトル、 \mathbf{P}_j は第 j リンクのワー

ワールド座標系における運動量, \mathbf{R}_j は第jリンクのワールド座標系における姿勢を示す回転行列, $\bar{\mathbf{I}}_j$ はローカル座標系における第jリンクの重心回りの慣性テンソル, $\boldsymbol{\omega}_j$ は第jリンクのワールド座標系における姿勢を示す回転行列である。

この目標角運動量 \mathbf{L}^{stab} を発生させるための体幹・両腕・遊脚の関節の角速度を次の角速度算出部によって算出する。

角速度算出部では, 目標角運動量 \mathbf{L}^{stab} を発生させるために必要な体幹・両腕・遊脚の角速度を算出する。

$$\mathbf{Y}^{(3 \times 1)} = \mathbf{A}^{(3 \times 12)} \dot{\boldsymbol{\theta}}^{(12 \times 1)} \quad 6$$

$$\mathbf{Y} \triangleq \mathbf{L}^{stab} - \sum_{j=1}^n S_j (\bar{\mathbf{c}}_j - \bar{\mathbf{c}}_{robot}) \times \mathbf{P}_j \quad 7$$

$$\mathbf{A} \triangleq [\mathbf{S}_T \bar{\mathbf{I}}_T^* \quad \mathbf{S}_{RA} \bar{\mathbf{I}}_{RA}^* \quad \mathbf{S}_{LA} \bar{\mathbf{I}}_{LA}^* \quad \mathbf{S}_{SwgL} \bar{\mathbf{I}}_{SwgL}^*] \quad 8$$

$$S = \begin{cases} 1 & (\text{use for stabilization}) \\ 0 & (\text{no-use for stabilization}) \end{cases} \quad 9$$

$$\bar{\mathbf{I}}^* \triangleq [\bar{\mathbf{I}} \quad \mathbf{a}_1 \quad \bar{\mathbf{I}} \quad \mathbf{a}_2 \quad \cdots \quad \bar{\mathbf{I}} \quad \mathbf{a}_m] \quad 10$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} \triangleq [\dot{\varphi}_{Trunk}^T \quad \dot{\varphi}_{RArm}^T \quad \dot{\varphi}_{LArm}^T \quad \dot{\varphi}_{SwingLeg}^T]^T \quad 11$$

ここで, $\mathbf{L}^{(3 \times 1)}$ は角運動量, $\mathbf{P}^{(3 \times 1)}$ は並進運動量, $\bar{\mathbf{I}}^{(3 \times 3)}$ は各部重心回りの慣性テンソル, $\bar{\mathbf{c}}^{(3 \times 1)}$ は各部重心位置, $\mathbf{a}^{(3 \times 1)}$ は回転軸ベクトル, $\boldsymbol{\varphi}^{(3 \times 1)}$ は各関節角度ベクトル, n は部位数, m は関節軸数を示す。

式4は角運動量が慣性テンソルと角速度の積で表されることを意味し, 式7は目標角運動量を各部の重心まわりに変換することを意味する。行列 \mathbf{A} は慣性テンソル行列であり, 各慣性テンソルは式10のように定義される。式8のように定義することで, 各部の関節軸まわりの角速度を算出することが可能となる。行列 \mathbf{A} は安定化に使用する部位の慣性テンソルが並ぶことになる。その部位を使用しない場合は慣性テンソルの代わりにゼロ行列を代入すればよい。(質量特性ゼロのリンクを動作させることと同じ)ここで, ゼロ行列を代入した場合, 式12で算

出されるその部位の角速度は任意ベクトル \mathbf{K} のものとなる。逆にいえば, 安定化に使用しない部位の動作を任意ベクトル \mathbf{K} で指定することができるということである。式9では, 安定化に使用する場合は1, 使用しない場合は0を選択する変数 S を定義した。この変数 S を空中相/接地相で切り替えることで安定化に使用する部位も切り替わるようにできる。これにより, たとえば体幹は空中相にのみ安定化に用いて, 接地相ではもとの初期姿勢にもどるように \mathbf{K} を与えることで姿勢の発散を防ぐことができる。

行列 \mathbf{A} は非正方行列であるため逆行列を持たない。従って擬似逆行列 \mathbf{A}^\dagger を用いることで式12が得られる。

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}^{stab} = \mathbf{A}^\dagger \mathbf{Y} + (\mathbf{E} - \mathbf{A}^\dagger \mathbf{A}) \mathbf{K}^{(12 \times 1)} \quad 12$$

ここで, \mathbf{E} は単位ベクトル, \mathbf{K} は目標角運動量 \mathbf{L}^{stab} を実現する際に矛盾しない範囲で設定可能な任意ベクトルを示す。(行列 \mathbf{A} の列数がベクトル \mathbf{Y} の行数よりも多いため, 解が無数に存在する。 $\mathbf{K}=0$ のときに, 目標角運動量 \mathbf{L}^{stab} を二乗ノルム最小の意味で実現する角速度が得られる。こうして得られた $\dot{\boldsymbol{\theta}}^{stab}$ が目標角運動量 \mathbf{L}^{stab} を発生させるために必要な体幹・両腕・遊脚の関節角速度である。この角速度を積分し関節の現在角に加算することでロボットへの入力としている。

3. 有効性検証

開発した角運動量補償制御の有効性を検証するため, 物理モデルシミュレータ MapleSim 上に構築した2足ヒューマノイドロボットモデルを用いた。ロボットの身体各部のリンク長や質量・重心位置・慣性モーメントといったパラメータはこれまでに開発しているロボット WATHLETE-1 と同等であり, 人間と同等のパラメータを実現している。跳躍中の動作による安定性を検証するため, 演者らがこれまでにやっている骨盤運動と脚弾性を利用したホッピング動作を行わせている状態で各跳躍時に外力

をロボットモデルの首部に与える。角運動量補償制御の有無により機体腰部姿勢の傾きの変化の違いを検証した。

本実験では、まず跳躍時体幹制御を用いない場合は、一貫して上半身の各関節は初期角度に固定している。実験開始時に右脚拇指球で立脚している状態から、低速走行と同程度の周期として1秒間に2回程度跳躍するようホッピングさせた。立脚中は跳躍エネルギーを獲得するために、骨盤が前額面にて揺動し、膝関節や足関節の弾性に共振によりエネルギーを蓄積する。床反力を用いて跳躍しているかどうかを判定し、跳躍中には次の着地に備え、水平面での重心速度および腰部姿勢に応じて、重心の水平面に対する投影点を基準に重心速度を小さくするよう着地位置を変更している。一方、跳躍時体幹制御を用いた場合は、上記で上半身を固定するのではなく、跳躍中に腰部姿勢の傾きに応じて体幹制御により体幹を動かし、立脚中には体幹角度を0[deg]に戻すように動かした。本実験では片脚によるホッピングのためYaw方向の回転が非常に小さいため、腕振りはいずれ体幹のみを用いた。

全身で角運動量補償制御を用いた場合のシミュレーションの様子を図2に示す。また、各実験条件におけるシミュレーション時の腰部の各方向の姿勢を図3に示す。角運動量補償制御を行わない場合は、跳躍時に外力を受けることによりRoll方向の全身角運動量が増大し回転してしまい、実験開始後1.6[s]ごろ数歩目で転倒に至っている。一方、角運動量補償制御を用いた場合には、跳躍時に外力を受けた場合には同じようにRoll方向の全身角運動量は大きくなっているが、跳躍時制御によりベース角度は初期値近くまで復帰している。その後立脚中には体幹自由度を初期角に戻しながらRoll方向の全身角運動量を小さくするように腕や立脚が動くので、全身角運動量は小さくなり体幹自由度も初期角近くまで戻っている。これにより、角運動量補償制御を用いない場合に比べ、同様

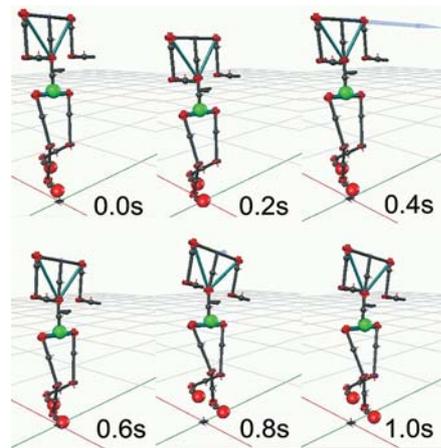
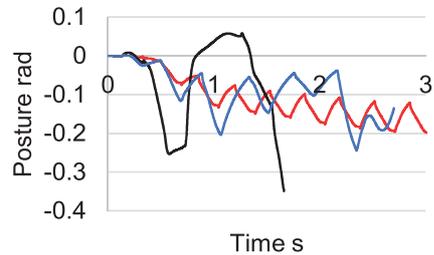


図2 動力学シミュレーションの様子



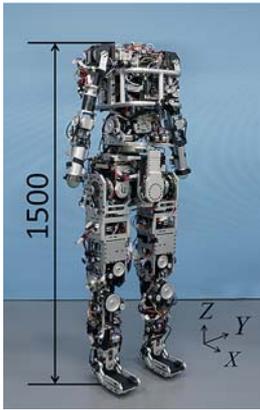
(黒線：提案手法なし、青色：体幹のみで制御、赤色：全身で制御)
図3 角運動量補償使用時のRoll方向腰部姿勢変化

の着地動作を継続し走行運動自体もより長く維持できている。

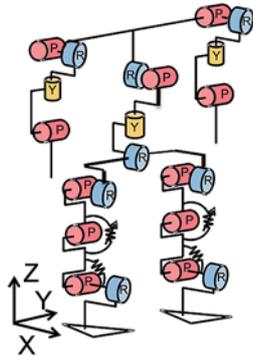
[今後の研究の方向、課題]

本研究では、安定したホッピング・走行運動の実現に向けて、下半身の運動により生じる角運動量を算出し、腰部姿勢のずれに応じて全身の角運動量を制御するよう上半身の運動を決定する角運動量制御を開発した。動力学シミュレーションによる評価実験において、開発した制御を用いることで跳躍中に外乱を受ける状態でも安定した走行運動を行えることを確認した。現在、実際の人型ロボット(図4)を用いた検証を進めており、論文執筆を進める。

本研究成果は、人型ロボットの運動能力向上を目指したものであるが、さらにその先の姿として、人被験者の代替としての人型ロボットの活用を見据えている。人が使用する製品のテストや、スポーツのより良いフォームの検証など



(a) 実際のロボット



(b) 自由度構成図

図4 人型ロボット WATHLETE-1

に、人を被験者とした人体運動解析が行われるが、被験者にケガの危険性のある実験は実施すべきでなく、また被験者への影響を定量的に評価することが難しい。様々なデータを計測可能なロボットを被験者としてすることが、真に人に最適な運動技術を明らかにする一助となると期待する。