

バネ・ダンパ系モデルを用いた受身制御による ヒューマノイドロボット転倒時の衝撃軽減

松井元希[†] 加藤昇平[†]

[†]名古屋工業大学

1 はじめに

ヒューマノイドロボットは段差などの障害物に強いという特徴から、ヒトの生活環境を変化させることなく導入可能である。しかし重心位置が高く足裏の支持面積が小さい傾向にあり、転倒の危険性が大きいことから、対策が必要不可欠となる。尾形ら [1] は腕部を用いた受身動作を生成することで転倒によるロボットの被害を抑える方法を提案している。本稿では尾形らの受身制御を参考に、転倒時の衝撃を軽減することを目的とした受身制御システムを構築し、着地後に腕部関節の角度制御を行う有効性を調査する。

2 受身制御システム

提案システムは「転倒検知」「受身姿勢決定」「着地検知」「腕部関節角度制御」の4部から構成される。本稿では、ロボットが受ける衝撃として重心が受ける鉛直方向の加速度を用いる。

2.1 転倒検知

転倒検知では、受身制御を行うために転倒の開始を判定する。尾形ら [1] の研究を参考に、以下の不等式を満たすとき、転倒を開始したと判定する。

$$|L| > \sqrt{2M^2g||G||^3(1 - \cos\theta_c)} \quad (1)$$

ここで L はロボット重心の角運動量ベクトル、 M はロボットの重量、 g は重力加速度、 G はロボット重心の位置ベクトル、 θ_c は立位状態の臨界角度を表す。

2.2 受身姿勢決定

受身姿勢決定では、腕部関節角度制御による衝撃軽減性を高めるため、転倒開始時にロボットの腕部関節を駆動させ、着地に備えた受身姿勢をとらせる。受身姿勢によりロボットが受ける衝撃の大きさや着地後の関節の動きに影響が出るため、機体性能や転倒の方向・速度等に合わせ受身姿勢を決定する必要がある。これについての詳細は第4節で述べる。

2.3 着地検知

着地検知では、ロボットの腕部が地面と接触する瞬間を判定する。ロボットは転倒状態の間、重心に下向きの加速度が発生している。しかし着地の瞬間、加速度は上向きに変化する。この変化を検知することで、着地の判定を行う。判定には以下の式を用いる。

$$A(t)A(t-1) < 0 \wedge A(t) > 0 \quad (2)$$

ここで t は時刻、 $A(t)$ は時刻 t におけるロボット重心の鉛直方向加速度を表す。ただし、受身姿勢決定部で腕部を駆動することによる重心加速度の変化を無視するため、受身姿勢が完了するまでは式 (2) の条件を満たしても着地したと判定しない。

2.4 腕部関節角度制御

腕部関節角度制御では、ロボットが受ける衝撃総量を減らすため、着地後に腕部関節の角度制御を行う。ロボットの肩ロール・ピッチ、肘ロール関節の左右計6関節にバネ・ダンパ系のモデルを適用する。バネ・ダンパ系のモデルにおいてバネとダンパに繋がれた質量 m の物体は、バネからは物体の移動距離 x に比例した抵抗力を、ダンパからは物体の速度 v に比例した抵抗力を受ける。バネ定数を k 、ダンパ定数を c とおくと、バネとダンパから受ける抵抗力により物体が受ける加速度 a を以下の運動方程式で表すことができる。

$$ma = -kx - cv \quad (3)$$

この運動方程式をロボットの腕部各関節に適用し、関節 i の時刻 t における目標角度 $angle_{g_i}(t)$ を以下のように算出する。

$$angle_{g_i}(t) = angle_i(t) - \frac{cv(t) + Ma(t)}{k} \quad (4)$$

ここで $angle_i(t)$ は関節 i の時刻 t における角度、 $v(t)$ 、 $a(t)$ はそれぞれ関節 i の時刻 t における角速度と角加速度、 M はロボット質量、 k 、 c はバネ・ダンパ系の運動方程式におけるバネ定数、ダンパ定数を表す。バネ・ダンパ定数を最適な値に設定することで衝撃軽減性を向上させることができると考える。そのため、Nelder-Mead Simplex Method (NMS) [2] を用いてバネ・ダンパ定数を探索し、準最適化を行う。本稿では、肩ロール・ピッチ、肘ロール関節の計3関節のバネ・ダンパ定数(6パラメータ)を探索する。ロボットの体格は左右対称なため、左右の関節で同じバネ・ダンパ定数を適用する。準最適化の評価指標となる評価関数 E は以下の式を表す。

$$E = \int_{FALL}^N |A(t)| dt \quad (5)$$

ここで $A(t)$ は鉛直方向の重心加速度、 $FALL$ は転倒開始した時刻、 N は衝撃が収束した時刻を表す。

3 衝撃軽減性評価実験

3.1 実験方法

3次元物理シミュレータ「Open Dynamics Engine」[3] 上に、実在するヒューマノイドロボット「KHR-2HV」を構築し(図1)、前方方向へ転倒させ、衝撃軽減性を評価する。予備実験において確認された、最も衝撃軽減性の高い受身姿勢(肩ピッチ関節角 $5\pi/18[rad]$ 、肘関節角 $\pi/3[rad]$)をロボットにとらせ、着地後に肩

Fall Impact Mitigation of a Humanoid Robot Using UKEMI Control with the Model of Spring-Damper System

Motoki MATSUI[†], and Shohei KATO[†]

[†]Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan
{mmatsui, shohey}@katolab.nitech.ac.jp

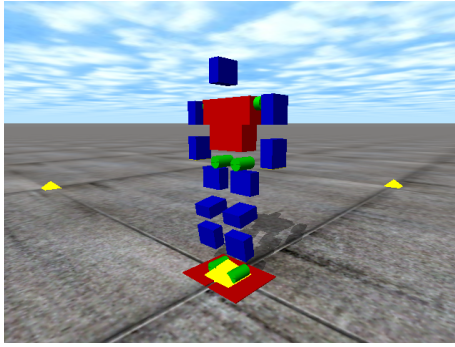


図 1: シミュレータ上のロボット

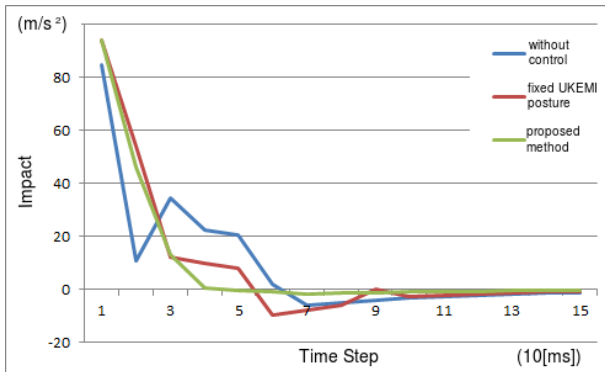


図 2: ロボット転倒時の鉛直方向重心加速度の変化
ロール・ピッチ, 肘ロール関節の左右計 6 関節を制御することで衝撃を軽減させる。目標関節角度の算出に用いるバネ・ダンパ定数は NMS を用いて準最適化する。「制御なし (条件 A)」、「受身姿勢に固定 (条件 B)」、「提案手法 (条件 C)」の 3 条件について衝撃軽減性を比較する。

3.2 実験結果

図 2 にロボットが着地した瞬間から 150[ms] 間における衝撃の変化を示す。転倒後 150[ms] 間にロボットが受けた衝撃は、式 (5) の評価関数 E を用いて比較する。表 1 にそれぞれの条件における評価関数 E の値を示す。条件 B においてロボットが受ける衝撃は、条件 A の約 104 % に増加することを確認した。これは受身姿勢設定のために腕部を駆動させることで転倒に勢いがついてしまったためと考えられる。しかし、条件 C において衝撃は条件 A の約 80 %, 条件 B の約 77 % に軽減できた。したがって、提案システムは転倒時の衝撃軽減において有効であると考えられる。

4 受身姿勢の決定方法

前節の実験では前方方向への転倒のみを考えたが、現実には様々な方向へ転倒することが考えられる。これに対応するため「受身姿勢決定」に「転倒方向検知」と「腕部拘束条件算出」の機能を追加する。

4.1 転倒方向検知

転倒方向検知では、ロボット転倒時の転倒方向を判定する。転倒方向は、ロボット重心の位置ベクトルと運動量ベクトルの外積である角運動量ベクトルを法線とする平面と、床面との交線であると考える。角運動量ベクトル $L = [L_{Gx}, L_{Gy}, L_{Gz}]$ より、転倒方向ベクトル V_{fall} は以下のように算出できる。

表 1: 評価関数 E

	条件 A	条件 B	条件 C
評価関数 E	202.3	210.4	161.7

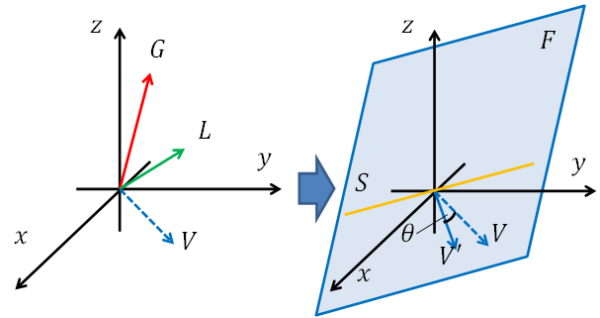


図 3: 拘束条件のための平面

$$V_{fall} = \frac{\pm 1}{\sqrt{L_{Gx}^2 + L_{Gy}^2}} \begin{bmatrix} L_{Gy}^2 \\ -L_{Gx}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

このとき、正負で二組ある解のうち、重心位置ベクトルとの内積が正の値を持つ解を転倒方向ベクトルとする。

4.2 腕部拘束条件算出

腕部拘束条件算出では、転倒方向に応じた受身姿勢をとるために、腕先の拘束条件を算出し、それに沿って腕部を駆動させる。ロボットの左右の腕部がほぼ同時に着地することで、着地時の衝撃を軽減し、スムーズに腕部関節角度制御へと移行することを目的とする。ロボット重心の角運動量ベクトル L と、位置ベクトル G の外積によって求められるベクトル V と、原点を通りベクトル V に直交する $x-y$ 平面上の直線 S について考える。直線 S を回転軸とし、ベクトル V を定数 θ だけ回転したベクトルを V' とする。ベクトル V' を法線とし、原点を通る平面を F とする (図 3)。このとき、平面 F 上にロボットの腕先を拘束するよう、ヤコビアンによってロボット腕部の関節角度を求め、受身姿勢をとる。

5 おわりに

本稿ではロボットの転倒時、腕部を用いた受身制御を行うことでロボットに生じる衝撃を軽減する受身制御システムを提案した。実験により、着地後にロボットの腕部関節を適切に制御することで、ロボットが受ける衝撃を軽減できることを確認した。現在は転倒方向を考慮した受身姿勢の決定方法として、「転倒方向検知」と「腕部拘束条件算出」の機能を実装中であり、今後はその効果を検証する。

参考文献

- [1] 尾形邦裕, 戸田健吾, 富山健. 2a1-d32 ヒューマノイドロボットにおける腕部を用いた受身動作生成. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2006, 2006.
- [2] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 308–313, 1965.
- [3] Open dynamics engine, <http://www.ode.org/>.