1M-02

手先拘束平面を用いた受身動作生成による ヒューマノイドロボットの転倒制御

松井元希 † 加藤昇平 †‡

† 名古屋工業大学 大学院工学研究科情報工学専攻
‡ 名古屋工業大学 情報科学フロンティア研究院

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ことが利点として挙げられる．しかし，車輪移動型ロボットと比較して重心が高く，足裏の支持面積が小さい傾向にある．このため転倒の危険性が大きく，対策が必要不可欠となる．ヒトは転倒時，腕部を用いた受身動作を行うことにより，衝撃を軽減する．この動作を参考に，先行研究 [1] として，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受身制御システムを提案した．しかし先行研究では前方への転倒についてのみ検証しており，他方向への転倒には未対応であった．本稿では，多方向への転倒に対応するため受身制御システムを拡張し，その衝撃軽減性を検証することを目的とする．

2 受身制御システム

提案システムは「転倒検知部」「転倒方向検知部」「受身姿勢決定部」「着地検知部」「腕部関節角度制御部」の 5 部から構成される．本稿では，先行研究 [1] から追加された「転倒方向検知部」と「受身姿勢決定部」について述べる．

2.1 転倒方向検知部

転倒方向検知部では，尾形ら [2] の研究を参考に，ロボット転倒時の転倒方向を判定する．ロボットの転倒方向は，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して張られ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 $L = [L_{G_x}, L_{G_y}, L_{G_z}]$ より，転倒方向ベクトル V_{fall} を単位ベクトルとすると，式（1）により算出できる．

$$V_{fall} = \frac{\pm 1}{\sqrt{L_{G_x}^2 + L_{G_y}^2}} \begin{bmatrix} L_{G_y}^2 \\ -L_{G_x}^2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

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．

2.2 受身姿勢決定部

受身姿勢決定部では，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る．転倒方向に応じた受身姿勢をとるために，手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，着地検知後スムーズに腕部関節角度制御部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，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 を手先拘束条件 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，原点を通る平面を手先拘束平面 F とする（図 1）．このとき，手先拘束平面 F 上にロボットの腕先を拘束するよう，ヤコビアン [3] によって求められるロボット腕部の関節角度に駆動させ，受身姿勢をとる．

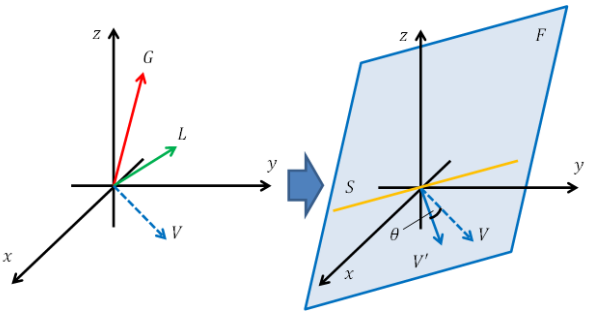

図 1: 手先拘束平面 F

3 パラメータ最適化

ロボットの機体構成や受身姿勢により，衝撃軽減性は変化すると考えられる．そのため，システムで用いる手先拘束条件等のパラメータを最適な値に設定する必要があるが，人手で最適値を探索することは困難である．そこで，Nelder-Mead Simplex Method（NMS）[4] を用いてパラメータを探索し，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），手先拘束条件（1 パラメータ）の計 7 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目標関数 E は以下の式（2）で表される．

$$E = \Sigma_{t=FALL}^{N} |A(t)| \tag{2}$$

ここで $A(t)$ はロボット重心加速度の鉛直成分であり，これをロボットが受ける衝撃とする．$FALL$ は転倒開始した時刻，N は衝撃が収束した時刻を表す．

4 衝撃軽減性評価実験

4.1 実験方法

3 次元物理シミュレータ「Open Dynamics Engine」[5] 上に，実在するヒューマノイドロボット「KHR-2HV」を構築し（図 2），前方，右前方（30deg.）の

Falling Control of Humanoid Robots by Generating UKEMI Posture Using Hand Restraint Plane

Motoki MATSUI†, and Shohei KATO†‡
†Dept. of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
‡Frontier Research Institute for Information Science, Nagoya Institute of Technology
†‡Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan
{mmatsui, shohey}@katolab.nitech.ac.jp

Copyright ©2017 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

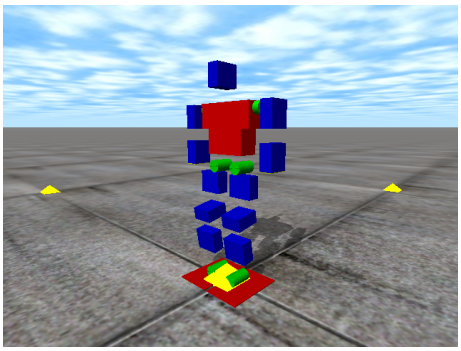

図 2: KHR-2HV

表 1: 最適化後の各パラメータ

	バネ定数	ダンパ定数
肩ロール関節	9186.66	-757.61
肩ピッチ関節	8629.60	-2752.76
肘ロール関節	13166.12	4465.60
手先拘束条件 (deg.)	37.67	

2 方向へ転倒させ，衝撃軽減性を評価する．着地後に左右肩ロール・ピッチ，肘ロール関節の計 6 関節を制御することで衝撃を軽減させる．各パラメータは前方への転倒で準最適化を行い，表 1 の通りとなった．制御なし（without），受身姿勢のみ行い着地後関節制御なし（armset），受身姿勢・着地後関節制御共にあり（control）の 3 手法について衝撃軽減性を比較する．

4.2 実験結果

図 3 に，転倒方向（front，right）と手法（without，armset，control）の組み合わせにおける衝撃の比較結果を示す．図 3 のグラフは式（2）において $N = 300$(ms) とした場合の目標関数 E の値を表す．いずれの手法も，300(ms) 時点で衝撃がほぼ収束していることを確認できる．前方，右前方への転倒において，without に対し armset の衝撃はそれぞれ約 71.7 %，約 72.4 %に軽減されていることを確認した．このことから，転倒方向に応じ受身姿勢をとる受身姿勢決定部は転倒時の衝撃軽減において有効であると考えられる．また，前方への転倒における armset に対する control の衝撃は約 98.0 %となった．このことから，着地後の腕部関節制御はさらなる衝撃軽減性を発揮するために有効であると考えられる．しかし，右前方への転倒における armset に対する control の衝撃は約 105.3 %となり，腕部関節制御を行わない場合よりも大きくなってしまった．これは，制御に用いるパラメータを前方への転倒で最適化したことが原因と考えられ，各パラメータを転倒方向それぞれに対し最適化することで，腕部関節角度制御部は転倒時の衝撃軽減においてより有効に機能する可能性がある．

次に，着地直後から 150(ms) 間の衝撃の変化を図 4 に示す．全ての転倒において，着地直後に衝撃は最大となり，その後振動しながら衝撃が収束していく様子が確認できる．前方，右前方への転倒いずれにおいても，衝撃の最大値は without より armset，control の方が大きくなっているが，これは受身のために腕部を駆動したことで，転倒の勢いを増したためと考えられる．しかし armset，control は，without よりも衝撃の

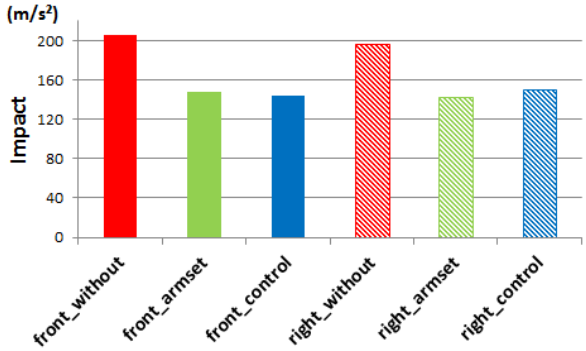

図 3: 衝撃の比較結果

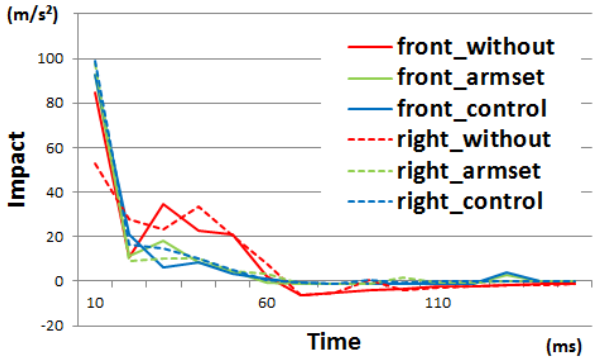

図 4: 転倒時における衝撃の変化

収束が早いことが確認できる。このことから，受身動作は衝撃の収束において効果を発揮していると考えられる．

5 おわりに

本稿ではヒューマノイドロボットの転倒時，腕部を用いた受身制御を行うことにより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，ロボットの腕部関節を適切に制御することで，転倒方向に応じた受身姿勢をとり，衝撃を軽減できることを確認した．また，転倒方向に応じ適切なパラメータを設定すること，着地直後に発生する最大の衝撃を軽減する制御を追加することにより，更なる衝撃軽減性を期待できる．今後はこれら 2 点を基にシステムを拡張し，衝撃軽減性を比較する．

参考文献

[1] 松井元希, 加藤昇平. 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. 情報処理学会第 78 回全国大会, pp. 1P–01, march 2016.

[2] 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, pp. 2A1–D32(1)–2A1–D32(4), 2006.

[3] 杉原知道. 全身型ヒューマノイドにおける脚動作の実時間生成に関する研究. 東京大学修士論文, 2001.

[4] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 308–313, 1965.

[5] Open dynamics engine, http://www.ode.org/.

Copyright ©2017 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.