転倒起立動作を可能とする耐荷重接触点を備えた 等身大人間型ロボットプラットフォーム RHP2 の開発

垣内 洋平^{*1} 掃部 雅幸^{*2} 下村 信恭^{*2} 柚木崎 創^{*2}
野沢 峻一^{*1} 岡田 慧^{*1} 稲葉 雅幸^{*1}

Development of Life-Sized Humanoid Robot Platform (RHP2) with Tough Contact Point for Continuing to Perform After Falls

Yohei Kakiuchi^{*1}, Masayuki Kamon^{*2}, Nobuyasu Shimomura^{*2}, Sou Yukizaki^{*2},
Shunichi Nozawa^{*1}, Kei Okada^{*1} and Masayuki Inaba^{*1}

In this paper, we described a developed life-size humanoid robot platform. A purpose of the development is to build a robot platform which can continue to work even when it falls.

To realize continuous operation while contacting with the environment, we designed to use linear actuators in order to endure impact force to joints. Tough contact points were located to support self-weight while contacting with environment. we present a methodology to create a motion which a robot contacts to environment without failure by using the tough contact points.

Proposed method was confirmed by the experiment that the robot fell down without mechanical failures and continued to work after falling down by using tough contact point.

Key Words: Humanoid Robot, Robot Platform, Fall Motion

1. はじめに

人間型ロボットが実際の工場や発電所、災害現場などにおいて作業が行えるようになるためには、外乱や故障などによる転倒などの場合においても、環境との接触等によって破損せず、起き上がって目的の動作を続ける、動作の継続性が必要である。転倒のような動作の失敗のみならず、環境との接触が前提となる動作が可能となることで人間型ロボットの作業範囲を拡大することができる。代表的な動作例としては、手をついて体を支え、移動する、寝転んで低い場所で作業して、起き上がるなどが挙げられる。Fig. 1 に開発したヒューマノイドロボットの想定する活動現場について示す。このような整っていない様々な環境において、ロボットが環境と接触しながら動作を行うことを将来の目的とし、接触時の荷重、衝撃以外の環境への適応を現場環境に応じたスーツを着替えることで行うことを考えている。

環境と接触する動作時には、従来の等身大ヒューマノイドでは、足先などを除き、接触することを前提としていない部位にお

Fig. 1 Developed humanoid platform [1]

いて環境との接触が生じた場合に、その自重の大きさからロボットが破損する可能性があり、ロボットのリンク構造やアクチュエータを破損し、継続的な動作が困難である。ヒューマノイドロボット競技会 DARPA Robotics Challenge Finals (DRC) [2] において、対策を行っていたにもかかわらず、競技中にヒュー

原稿受付 2018 年 1 月 31 日

^{*1}東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*2}川崎重工株式会社

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

^{*2}Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

■ 本論文は有用性(要素分野)で評価されました。

マノイドロボットが多数転倒し、ほとんどが転倒後に動作を続けることができなかった。参加したロボットの転倒対策について以下に述べる。

DRC-HUBO+ [3] は、2足歩行時は本質的に不安定であり転倒してしまうことを避けるために、必要に応じて2足歩行と車輪移動を切り替えて移動できるハードウェアを設計した。階段や車からの降りる動作以外では歩行移動を行わず、競技中に転倒に至ることはなかった。

WALK-MAN [4] の関節は Series elastic actuator (SEA) を構成する回転軸となっており、ハーモニックギアと身体リンクの間に弾性を持った部材が配置されている。転倒時のハーモニックギアへの影響はこの弾性によって少なくなっている。また、衝撃を吸収するカバーによって転倒に備えている。電源系統の問題により動力を失い転倒しているが、ハードウェアは破損しなかった。

ESCHER [5] では、上半身は回転駆動関節によって構成し、下半身は直動 SEA を用いて構成している。衝撃吸収材を腰部や大腿部に取り付けていた。転倒時には制御系によってハードウェアリミットを超えて、破損する方向へトルクが出力され、自損によってアクチュエータを破損した。

JAXON [6] では、背面のフレームの変形をもって転倒時の運動エネルギーを吸収しているが、数回の転倒では変形が蓄積し破損につながる方法である。競技中の背面からの転倒時には、ハードウェアは破損しなかったが、安全のため非常停止しており動作は継続できなかった。また、腕からの転倒では腕の構造部材が破損してしている。

このように、衝撃や大きな荷重を受け破損しない部位は極めて少なく、ロボット表面の任意の部位を後から十分に強化するのは難しく、また、弾性要素を含まないアクチュエータは、衝撃力によって破損する可能性が高い。これらの知見から、環境と接触する動作を行うためには、ロボットの設計段階において環境と接触できる部位をロボット身体に複数配置しておくことが有効であると考え、あらかじめロボットの身体を支えることができるよう設計し、身体各部に配置した環境と接触できる部位を耐荷重接触点 (Tough Contact Point) とよぶ。耐荷重接触点によって環境と接触する動作を計画し、動作を行う前に環境との接触により破損しないことを検証できるようにすることで、ロボットが故障しない動作を行わせることができる。

転倒時などの衝撃があっても動作を継続するロボットとして構成するには、配置した耐荷重接触点とそれを用いた動作計画に加えて、関節やアクチュエータといったハードウェア要素についても、衝撃により破損しにくい構成にし、環境との接触時に衝撃が加わりにくくすることが必要である。これらの環境との接触に対応できるロボットの要素と、ロボットの構成要素の耐力を前提とした環境接触動作の生成によって、環境と接触しながら破損せずに動作を継続できるロボットとすることができる。

本論文では、2章において、環境接触に伴う衝撃に耐えるために必要な要素を持った開発した等身大ヒューマノイドの外装構造・関節構造について示す。3章において、環境と耐荷重接触点によって接触する動作生成手法として、転倒時の動作について、耐荷重接触点を用いた転倒姿勢の評価を行い、ロボット

が破損しない安全な転倒動作の生成を行った。4章において、開発したロボットを用いて転倒実験を行い、耐荷重接触点を用いた転倒動作によりロボットが壊れずに動作を継続できることを示した。

2. 耐荷重接触点を備えたヒューマノイドロボットの開発

本章では、開発した衝撃対応等身大ヒューマノイド Robust Humanoid Robot Platform 2 (以下 RHP2 とよぶ) について述べる。RHP2 は東京大学情報システム工学研究室と川崎重工業株式会社との衝撃対応等身大ヒューマノイドに関する共同研究プロジェクトにおいて開発されたものである。

2.1 RHP2 のハードウェア構成

Fig. 2 に RHP2 の主要寸法と関節構成を示す。RHP2 の全長は 1.75 [m] 重量は 84 [kg] である。自由度数は脚 6 自由度、腕 8 自由度、体幹 2 自由度、首 2 自由度の、合計 32 自由度となっている。脚部、腕部の一部に、電動モータを用いた直動アクチュエータを採用しており、直交の 2 自由度の回転関節を二つの直動アクチュエータによって非独立に駆動する 2 自由度リンクユニットを、股関節、足首関節、手首関節に採用している。Fig. 2 の “1DOF - 1Linear Actuator” により示した首、膝関節、肘関節は 1 自由度関節を一つの直動アクチュエータにより駆動する単純なリンク機構となっている。“2DOF - 2Linear Actuator” により示した関節は二つの直動アクチュエータで二つの回転関節を駆動する軸である。それ以外の軸は、電動モータと歯車により回転駆動される回転関節である。

本ロボットの基本となるリンク構造はシンプルかつ強度・剛性が高いアルミバーにより構成されており、環境とのリンク機構や配置されているモータ等への直接の接触を保護する目的として金属フレームが配置されている。環境へ適応するために、埃、砂、水などの侵入を防ぐ目的でのスーツを着用する場合に、金属フレームによって、ロボット内部の歯車や関節などへのスーツの巻き込みを防ぐことができる。

直動アクチュエータの採用は、歯車減速機構を除くことによって関節にかかる衝撃力により破損しにくくし、また、減速機の高減速比に起因するバックドライバビリティの低下、高減速比の減速機における小型化と高トルク出力とのトレードオフを解

Fig. 2 RHP2: Principal dimensions and joint configuration

Table 1 RHP2's and human ranges of joint motion. Ranges of left joints are symmetrical to right joints [1] [7]

Limb	Joint No.	Motion Range [deg]	Human Range [deg]	Gear Ratio
Head	14	-60, 60	-60, 60	63
	15	-12, 40	-30, 45	84.5
Torso	12	-22, 22	-50, 50	150.3
	13	-15, 65	-30, 65	164.2
Right Arm	16	-25, 25	-20, 20	156
	17	-175, 175	-180, 50	94.5
	18	-86, 0	-180, 75	94.5
	19	0, 109	-70, 90	87.2
	20	-130, 0	-5, 145	113.9
	21	-40, 40	-70, 90	157.1
	22	-40, 40	-25, 55	125.7
	23	-40, 40	-90, 90	63.0
Right Leg	0	-45, 45	-10, 20	90.0
	1	-90, 30	-120, 15	157.3
	2	-30, 38	-20, -45	141.5
	3	0, 140	0, 130	183.2
	4	-38, 38	-20, 30	141.5
	5	-90, 40	-45, 20	157.3

決することを目指している。

本ロボットでは、電動直動アクチュエータを採用しているが、将来的には、油圧駆動ユニットへ置き換えることで、さらに高出力かつ耐衝撃に優れた駆動方式とすることができる。

2.1.1 関節可動範囲

Table 1 に、ロボットの各関節の可動範囲と、人間の対応する関節の可動範囲 [7] について示す。

人間にあって RHP2 にない軸は、首ロール軸、腰ヨー軸、下腿ヨー軸である。脚については、ほぼ人間と同等の可動範囲となっている。

腕について、肩ロール軸では RHP2 は体側への可動範囲がなく、外側へも 86 [deg] となり、人間はピッチ軸回り、ロール軸回りの両方において腕を真上に挙げることができるが、RHP2 はピッチ軸回りでのみ可能である。肩ヨー軸についても、内側への旋回の可動範囲がない。手首ピッチ軸については、人間の 2 分の 1 程度の可動範囲となっている。マニピュレーションにおいて到達可能範囲は、人間に比べて体幹正面が狭いと推測する。RHP2 の腕の可動範囲は、3 章と 4 章における前方向の転倒と起き上がり動作には大きな影響がなく、矢状面内の動作には十分な可動範囲であると言える。

RHP2 の腰ロール軸の可動範囲は、人間の 2 分の 1 ほどであり、RHP2 には腰のヨー軸がないことから、横方向への転倒時に衝撃が十分に小さくなる転倒姿勢の作成が難しくなっている。

回転アクチュエータと歯車減速を用いた回転関節とは異なり、直動アクチュエータを用いた場合の関節速度と駆動モータ速度の関係は、関節機構ユニットのモーメントアームが関節の角度によって異なるため一定ではない。Table 1 では、関節角度が 0 [deg] の回転速度比を値をギア比としている。

2.1.2 一つの直動アクチュエータを用いた関節

1 関節を一つの直動アクチュエータにより駆動する軸についての、アクチュエータ速度と関節の速度の関係について述べる。**Fig. 3** に、膝軸の関節角度に依存する直動アクチュエータの長

Fig. 3 Ratio of linear actuator movement and joint angle of knee pitch joint **Fig. 4** 2DOF joint driven by 2 linear actuator units

さと関節角度の変化率について示す。関節角度最小 (0 [deg]) と関節角度最大 (130 [deg]) へ向かって関節角度を変化させるのに必要な直動アクチュエータの変化量が小さくなり、53.1 [deg] のところで最大となっている。膝関節については関節角度最大時と最小時にギア比が低くなり、膝を曲げている中間部でギア比が最大となる。

膝を最大角度付近まで曲げて自重を支える姿勢とした場合にギア比が低くなり、最大速度および最大出力トルクが小さくなることから、動作生成時に必要な関節速度、トルクを決定した後に関節角度から速度とトルクの制限を求め、出力可能であるか確認しなければならない。

次に説明する直動 2 軸駆動・回転 2 自由度の関節に関しては、2 自由度の同時に出せる速度およびトルクが独立ではないため、2 関節の関節角度から、それぞれの速度とトルクの制限を求める必要がある。

2.1.3 直動 2 軸駆動・回転 2 自由度閉リンク機構ユニット

開発したロボットの腰ロール・ピッチ軸、股関節ロール・ピッチ軸対、足首ロール・ピッチ軸対、手首ロール・ピッチ軸対の駆動に用いられる、直動 2 軸駆動・回転 2 自由度閉リンク機構ユニットの動作を **Fig. 4** に示す。この機構では、2 本の直動アクチュエータを駆動することで、二つの直交する回転関節を任意の角度へ動かすことができる。

直動 2 軸駆動・回転 2 自由度閉リンク機構ユニットについて

Fig. 5 Ratio of linear actuator movement and joint angle of ankle pitch/roll joint

も、アクチュエータ速度と出力と関節の速度と出力の関係は関節角度に応じて変化する。**Fig. 5** に二つの直動アクチュエータにより二つの回転関節駆動する、足首のピッチ軸、ロール軸について、関節角度に依存する直動アクチュエータの長ささと関節角度の変化率について示す。この図は、ロール軸を 0 [deg] にした場合、ピッチ軸関節角度と直動アクチュエータの比と、ピッチ軸を 0 [deg] にした場合、ロール軸関節角度と二つの直動アクチュエータの比について示す。ロール軸を 0 [deg] とし、ピッチ軸の関節角度を変化させる場合は、2 本の直動アクチュエータの長さと同じとなるため、図中には一つの線により表す。

2.2 ロボット全身行動制御システム

RHP2 の基本的な全身行動指令システムの概略図を **Fig. 8** に示す。RHP2 では、既存の産業用ロボットに用いるコントローラを体外に設置し、全関節軸のモータの電源線と制御に必要なエンコーダ線等をロボットと接続しており、ロボット体内には制御用のコントローラおよび計算機は搭載していない。体外コントローラは一つあたり 6 軸を同時に駆動することが可能で、RHP2 では 4 台使用することで全身の関節を駆動している。手首と頭部の関節については、サーボモータは搭載しているが駆動していない。

体外コントローラは有線 EtherNet によって制御用 PC と通信を行い、制御用 PC から 4 [ms] 周期で関節角度指令を受け取り、同じ周期でエンコーダで計測される現在関節角度と電流値を返している。また、力センサ、姿勢センサ、カメラといったその他のセンサ類も有線にて制御用 PC に接続されている。

本ロボットのソフトウェアは上位層から順にユーザインタフェース層・コントローラ層・ドライバ層の 3 層に分けられる。ドライバ層は体外コントローラとの通信および、カメラ以外のセンサのデータを読みコントローラ層へ送っている。コントローラ層は、ロボット制御ソフトウェアモジュール群である hrpsys-base[†] を用いて構成されている。コントローラ層とドライバ層にはリアルタイム性が要求される。リアルタイム性を要求される層と非同期に動作する、ユーザインタフェース層には ROS^{††} を用いており、筆者らが [8] において構成したヒューマノイドロボットの操縦インタフェースをそのまま使うことができる。コントローラ層も同じく [8] において使用している、回転関節のみで

Table 2 The specification of adopted ball screw [1]

Lead	[mm/rot]	2
Stroke	[mm]	138
Static rated load	[N]	2,300
Dynamic rated load	[N]	1,300

Table 3 Maximum torque comparison RHP2 and JAXON

Limb	Joint No.	RHP2 Ball screw [Nm]	JAXON [Nm]	Ratcheting torque [Nm]
Right Arm	20	114.9	220	220
Right Leg	1	253.3	450	500
	2	228.0	679.9	1,000
	3	195.6	679.9	1,000
	4	228.0	220	220
	5	253.3	220	220

構成されるロボットの運動制御モジュールを用いて構成している。RHP2 は直動アクチュエータを用いたロボットであるため、直動アクチュエータ長と関節角度を変換するモジュールを追加する必要ある。

具体的には、モジュール (a) 直動アクチュエータ長を関節角度へ変換するモジュール、モジュール (b) 関節角度を直動アクチュエータ長へ変換するモジュールの二つのモジュールを用いる。モジュール (a) を使用しロボットから送られてきた直動アクチュエータ長を関節角度へ変換し、関節角度のみを扱う制御モジュール群へ送り、制御モジュール群においてロボットへの指令値として出てきた関節角度を、モジュール (b) を使用し直動アクチュエータ長へ変換してロボットへ送っている。

モジュール (b) は、関節角度から順運動学計算によって求められるリンク位置より直動アクチュエータの長さを計算できるため比較的容易に構成できるが、モジュール (a) この逆関数を求める必要があり計算が煩雑になる。したがって本ロボットにおいては、モジュール (b) の計算を用いて、関節角度と直動アクチュエータ長のマッピングを記録したテーブルをあらかじめ作っておき、テーブルの値を用いることでモジュール (a) の計算量を低減している。

2.3 外部からの衝撃に耐える関節構造

本ロボットは直動アクチュエータユニットを用いることで、JAXON [6] などで用いられる従来のハーモニックドライブなどの減速機を用いた関節構造に比べて外部からの衝撃に強い駆動機構を構成している。

直動アクチュエータは、電動機からプーリーを介してボールねじの軸に回転を伝え、ナットの直線運動をアクチュエータの駆動量として取り出している。アクチュエータの耐力はボールねじの静定格荷重 (Static rated load) によって決まる。**Table 2** にボールねじの仕様を示す。関節の制限トルクとして、アクチュエータに働く力が静定格荷重と同等になる関節トルクを **Table 3** に示した。

Fig. 6 に直動アクチュエータユニットの構成を示す。モータからプーリーを介してボールねじの軸に回転を伝え、ナットの直線運動をアクチュエータユニットの駆動として取り出している。モータの回転とアクチュエータユニットの直進の変換率はプーリ比とボールねじのリードによって決定される。

[†]<https://github.com/fkanehiro/hrpsys-base>

^{††}www.ros.org

Fig. 6 Linear actuator unit using a electric motor [1]

JAXON [6] では、減速機にハーモニックドライブの CSD-20, 25, 32 等を用いており、その関節の使用限界は減速機のラチェティングトルクとしている。それぞれのラチェティングトルクは、220, 500, 1,000 [Nm] となる。また、瞬時最大許容トルクは、76, 152, 359 [Nm] である。Table 3 に RHP2 と JAXON の関節のトルク比較を示す。RHP2 の直動アクチュエータ出力がボールねじの静定格荷重となる関節トルクを ‘RHP2 Ball screw’ の列に示す。‘JAXON’ の列に JAXON の最大出力トルク、‘Ratcheting torque’ の列に用いたハーモニックギアのラチェティングトルクを示す。足首関節 (Joint No. 4, 5) においては、RHP2 と JAXON の最大トルクはほぼ同等であり、股関節 (Joint No. 1, 2) においては、RHP2 の最大トルクは半分程度となっている。膝関節 (Joint No. 3) においては、3 分の 1 程度となっている。

しかしながら、ハーモニックドライブにおいては、ラチェティングトルクは瞬時最大許容トルクのほぼ 3 倍であり、瞬時最大許容トルク以上では減速機とロボット機構をつなぐ締結力を超えてしまい、締結ズレ、および、ネジゆるみの原因となっていると考えられる。また、ラチェットすると、モータのエンコーダとロボット関節の角度の関係がキャリブレーション時と異なってしまうため、モータエンコーダを基準に制御しているロボットでは、動作を続けるためにはリンク間の関節角度を直接計測する外部のアブソリュートエンコーダによる調整等が必要となる。

それに比して、直動アクチュエータモジュールに用いるボールねじについては、静定格荷重が限界荷重というわけではなく、わずかな時間それ以上の荷重を受けても、異状なく動作を続けることができる。また、ハーモニックドライブの出力部のように、ねじ止めのみでトルクや力を受ける部分がなく、出力や逆入力トルクの大きさに起因したズレや故障が生じにくい構成となっている。

2.4 外部からの衝撃に耐える身体構造

等身大ヒューマノイドにおいて、環境と接触する際に起きる破損から保護するために適切な外装構造が必要である。転倒時や環境に接触した動作を行う際に、積極的に環境に接触させる耐荷重接触点を外装構造に配置する。耐荷重接触点は設計段階において、環境と接触できる部位として強度等を計算しておき、

Fig. 7 Tough Contact Points which enable contacting with environment [1]

ロボットの動作計画時に耐荷重接触点のみが環境に接触する動作として計画することで、計画した動作によりロボットの身体が破損するかを検証することができる。

耐荷重接触点を全身に配置した。RHP2 で配置された耐荷重接触点を Fig. 7 に示す。耐荷重接触点の配置は、体幹に、‘Chest’ (体幹全面)、‘Back’ (体幹背面)、‘Hip’ (臀部、背面腰下部) 腕部に、‘Elbow’ (肘)、‘Hand’ (手先)、脚部に、‘Thigh’ (大腿部)、‘Shank’ (下腿部)、‘Knee’ (膝) を配置している。‘Chest’、‘Elbow’、‘Knee’ には衝撃吸収材を取り付けている。

文献 [9] の前方、後方転倒動作、および、文献 [10] の起き上がり動作を参考にして耐荷重接触点の配置を決めている。転倒時と起き上がり時に地面と接触する部位として、前方への着地の際には手先、肘、胸、膝を用い、後方への転倒の際には臀部、大腿部、背面を用いることを想定している。起き上がりでは、手先、背面、胸、肘、膝を用いる。

3. ハードウェアが破損しない転倒動作の構成法

3.1 従来の転倒動作の構成法

等身大ヒューマノイドは立脚時の重心が高く転倒した場合には、破損して動作継続が不可能になってしまうことが多い。その対策として、ロボットの構成や追加の機構を加えることで、機械的な衝撃に対する耐性を向上させた転倒動作の構成法がある。文献 [11] や文献 [12] では、転倒を検知し転倒時のみ有効になるアクティブな衝撃吸収機能の付加をエアバッグなどを用いて実現している。この例では、転倒を検出するための検出部が必要になること、また、アクティブであることで比較的大きな機構部品をロボットに装着することになる。文献 [13] では体幹背面の破損しない部位つくり転倒し関節へ力をかけない転倒方法が示されている。文献 [6] では、フレームの変形をもって転

Fig. 8 Control system of RHP2 [1]

倒時の運動エネルギーを吸収しているが、数回の転倒では変形が蓄積し破損につながる方法である。

本ロボットにおいては、転倒時にも破損しない強度であることを評価できる耐荷重接触点を設けて、転倒時や環境接触動作時は積極的にその部位を用いることで破損しないロボット部位を実現している。

転倒時の環境との接触力／衝撃力を小さくする手法として、転倒した時の姿勢に注目して、文献[14]、文献[15]には、転倒時に環境とロボットとの接触力が小さくなる転倒姿勢をオフラインで検討する方法が示されている。また、文献[16]、文献[17]には転倒時に衝撃を緩和させるようにオンラインで転倒姿勢を制御する方法が示されている。文献[18]においては、転倒時のエネルギーを連続した複数回の環境との接触によって、過大な接触力を発生させずにエネルギーを減ずる手法を用いている。

上記の衝撃緩和に追加して、関節ゲインを変更して衝撃を吸収する手法がある[19]。この方法についても、減速機構などの関節構造やアクチュエータの速度やトルクの制限などの関係から、吸収できる衝撃は関節ごとに異なるため、破損するかどうかは実際のロボットにおいて検証が必要になる。本論文ではアクチュエータによるエネルギー吸収には期待せずに、アクチュエータの駆動方向以外への力を受ける姿勢を作り、アクチュエータはシミュレータや姿勢の誤差によって生じる衝撃力に耐えている。

実際のロボットが転倒時に破損するか判断するには、接触力／衝撃力の大きさと、その力が入る部位の強さを対比させて評価しなければならない。本論文においては、接触点をロボットに設けた耐荷重接触点に限定することで、転倒姿勢と強度評価を容易にしている。既存の環境との接触力／衝撃力を小さくする手法と併用することでより安全な転倒動作とすることができる。

3.2 耐荷重接触点を用いた転倒動作の構成

本論文では、転倒を体幹の傾きにより検知したときに、オフラインで決めた姿勢に遷移している。転倒姿勢として、耐荷重接触点によって環境と接触する姿勢を作り、シミュレーションを用いて、環境と接触する点と環境と接触したときに耐荷重接触点に生じる接触力を求めて、破損しにくい転倒姿勢を構成す

Fig. 9 Poses for falls using tough contact point

る。耐荷重接触点を着地点として考えた前方への転倒姿勢について Fig. 9 に示す。

Fig. 9 左上 (a) の姿勢は、衝撃力を可能な限り減らすために、腕を伸ばすなどによって重心位置の高い状態で着地するを計画した姿勢である。転倒時の衝撃力の原因は、直立状態の位置エネルギーが転倒により運動エネルギーに変換されることにある。ヒューマノイドの直立状態時の重心の高さと着地時の重心の高さの差が小さくなるようにすることができれば、小さい運動エネルギーで衝突することができる。

Fig. 9 右上 (b) の姿勢は、着地時に駆動系に衝撃を加えないために、関節の曲がらない方向へ力を受けることを計画した姿勢である。センサ部、アクチュエータ部は、衝撃によって破損し、致命的な損害を受ける可能性が高い箇所である。センサ部は外装によって適切に保護することにより、破損を最低限に抑えることが可能であるが、アクチュエータ部は外力によって直接力を受けるため、外装による保護には限界がある。前方に転倒する際に、手先からつくのではなく肘で地面に着地し、上腕が地面と垂直になる姿勢とすることで肘関節ピッチ軸への衝撃

を小さくし、より強度の高い襟関節ヨー軸で衝撃力を受けることができる。

Fig. 9 左下 (c) の姿勢は、体幹の耐荷重接触点を使って転倒し、腕などの関節へ力をかけないことを計画した姿勢である。関節の強度の面で、最も強く作られているのは体幹部分である腰関節である。比較して強度の低い腕の関節への衝撃力を軽減するため、より強度の高い体幹の耐荷重接触点から着地することによって破損を防ぐことを目的としている。

これらの転倒姿勢について、シミュレーションによって転倒時の接触箇所および接触力を求めた。シミュレーションには choreonoid [20] を用いた。Table 4 に得られた最大の接触力と、最大接触力のときに発生する応力が最も大きくなる部位での応力について示す。表中の Load Area は、接触箇所に力が発生したときに応力が大きくなる、すなわち破損すると考えられる場所に設定した。この面積が応力計算するときに用いる荷重面積であり、Fig. 10 に各部位の荷重面積を求めた箇所を示す。検討した三つの転倒姿勢では最大応力が発生する箇所は異なるが、Fig. 9 右上 (b) の転倒時に肘をつく転倒姿勢が最も発生応力が低くなっており、破損しにくい姿勢であるとし、次章で説明する実験において実機を転倒させた場合の評価を行う。

4. 転倒時の衝撃に耐える耐荷重接触点の検証

4.1 転倒時の衝撃計測

前章の姿勢検討の結果、最も破損しにくいと推定した姿勢

Table 4 Stress of parts using forces calculated by simulation

	Force [N]	Stress [MPa]	Parts	Load Area [mm ²]
Pose a)	63,300	211	wrist	300
Pose b)	93,000	194	elbow	480
Pose c)	179,000	406	chest	440

Fig. 10 Load area for tough contact point

(Fig. 9 右上 (b) に示した膝と肘をつく転倒動作) について、実機を用いて直立状態から転倒させる実験を行った。地面とロボット外装の衝突による破損、および、シミュレーションの衝撃力の見積もり誤差によるロボットのリンク構造の破損を防ぐ目的で、外装に衝撃吸収材を付加することを検討し、その効果を検証した。

衝突衝撃が小さい条件において転倒時の自重を支える力によるフレームの塑性変形がないことの確認と、シミュレーション時と同様な耐荷重接触点にてロボットと環境が接触することの確認のため、厚み 50 [mm] の体育用マット上へ転倒させる。フレームに変形のないこと、耐荷重接触点にてロボットと環境が接触することが確認できた後、耐荷重接触点へ衝撃吸収材としてポリエチレンフォームを付加し、その厚みによって体へ加わる衝撃がどの程度変化するか検証した。ポリエチレンフォームは 25% 圧縮応力 275 [kPa] 見掛け密度 110 [kg/m³] のものを用いた。

Fig. 12 に転倒時の加速度の計測結果を示す。加速度計は、体幹リンクの x 軸方向（ロボットの水平前方）に、小野測器の加速度ピックアップ NP-3120 を取り付けしている。シミュレーションから転倒時の主要な加速度方向は x 軸方向であると推定されている。

体育用マットとへの転倒と耐荷重接触点に 50 [mm] ポリエチレンフォームを付加した時の床への転倒はほぼ同程度 (30 [G]) の加速度となった。これと比較して、耐荷重接触点に 25 [mm] ポリエチレンフォームを付加したときの床への転倒は、計測した加速度は 2 倍以上 (80 [G]) となっている。衝撃吸収パーツの取り付けによって衝撃が低減されている。シミュレーションで求めた転倒時の x 方向加速度のピークは 233.9 [G] であり、シミュレーションには弾性要素が入っておらず大きな値であり、衝撃吸収材により衝撃が低減されていることが分かる。

耐荷重接触点への 50 [mm] 厚のポリエチレンフォームの付加により、転倒時の体幹加速度はマットへの転倒と同程度であり、この厚みの衝撃吸収材はロボットの動作を妨害しないため、50 [mm] 厚の衝撃吸収材を採用する。

複数回の転倒による衝撃力の違いを評価するために、耐荷重接触点へ 50 [mm] 厚のポリエチレンフォームを付加して行った 3 回の転倒試験の結果を Fig. 13 に示す。Fig. 11 に床への転倒実験の様子を示す。

グラフ中 2nd で示した試行において、ごく短時間のピークの

Fig. 11 Experiment of falls to a floor

加速度で 55 [G] を示しているが、明らかに転倒し衝撃が加わり始めた後でピークが来ているため、肘以外で衝撃吸収材の薄い部位での接触が計測されたものと考える。

4.2 転倒後の動作継続実験

転倒した後も損傷せず、動作を継続できるハードウェアとなっていることを実機実験によって実証的に示す。Fig. 14 に転倒起き上がり実験の様子を示す。実験は以下のように進行した。

0.0 [s] 直立状態において、前方に押すことでロボットを転

Fig. 12 Comparison of shock absorbing materials [1]

Fig. 13 Measured acceleration of falls to a floor. tough contact points was covered by polyethylene foam of 50 [mm] thickness

倒させる。

2.0 [s] ロボットが姿勢 (b) で床に転倒

10.0 [s]～ 転倒後、起き上がり動作を開始する

49.5 [s], 50.5 [s] 起き上がり動作途中のロボットを後方に押して再度転倒させる

58.0 [s]～ 再び、起き上がり動作を開始する

98.0 [s] 初期と同じ直立姿勢へと復帰

提案手法を用いて構成した転倒姿勢について、直立状態から転倒してもロボットが破損せずに動作を継続することができ、複数回の転倒においても動作を継続し、再び直立状態へ復帰できることが示された。

5. おわりに

本論文では、等身大ヒューマノイドロボットが環境と接触した全身動作を行うことができ、転倒した場合においても起き上がり動作を継続できるための衝撃対応を可能とすることを目的として、転倒の衝撃に耐える外装を含んだ、環境への接触構造を備えたロボットの身体構成と、環境と接触する動作の生成法について述べた。

ロボットの身体構成として、従来のロボット関節よりも衝撃に耐える直動アクチュエータを用いた関節構造を採用し、ロボット身体に転倒時の衝撃に耐えることのできる耐荷重接触点を配置する外装構造について提案し、それらを用いて等身大のロボットとして構成した。環境と接触しても破損しない動作の生成法について、転倒動作を例にとり、耐荷重接触点のみを接触点とする動作として計画し、シミュレーションにより得られた接触力を用いて破損しない動作を構成できることを示した。

故障することなく環境と接触できる耐荷重接触点を設計段階から計画し身体に配置した、開発した等身大ヒューマノイドロボットを用いて、耐荷重接触点の耐力を前提として生成した転倒動作によって、転倒後も動作を継続できるロボットとなることを実験により示した。等身大ロボットの実機が転倒しても破損しないで動作を継続するためには、設計段階から環境と接触

Fig. 14 RHP2 fell down to a floor, tried to stand up [1]

できる部位を設定し、動作計画時に設計情報を用いて動作の評価を行うことが有効であることが示せた。今後、様々な環境において実ロボットを用いた試行錯誤型行動を可能とするヒューマノイドロボットプラットフォームの構成法を示すことができた。

参考文献

- [1] Y. Kakiuchi, M. Kamon, N. Shimomura, S. Yukizaki, N. Takasugi, S. Nozawa, K. Okada and M. Inaba: "Development of life-sized humanoid robot platform with robustness for falling down, long time working and error occurrence," 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.689–696, 2017.
- [2] E. Krotkov, D. Hackett, L. Jackel, M. Perschbacher, J. Pippine, J. Strauss, G. Pratt and C. Orlowski: The darpa robotics challenge finals: Results and perspectives, 2018.
- [3] T. Jung, J. Lim, H. Bae, K.K. Lee, H.M. Joe and J.H. Oh: "Development of the humanoid disaster response platform drchubo+," IEEE Transactions on Robotics, vol.34, no.1, pp.1–17, 2018.
- [4] N.G. Tsagarakis, D.G. Caldwell, F. Negrello, W. Choi, L. Baccelliere, V.G. Loc, J. Noorden, L. Muratore, A. Margan, A. Cardellino, L. Natale, E. Mingo Hoffman, H. Dallali, N. Kashiri, J. Malzahn, J. Lee, P. Kryczka, D. Kanoulas, M. Garabini, M. Catalano, M. Ferrati, V. Varricchio, L. Pallottino, C. Pavan, A. Bicchi, A. Settini, A. Rocchi and A. Ajoudani: "Walk-man: A high-performance humanoid platform for realistic environments," Journal of Field Robotics, vol.34, no.7, pp.1225–1259, 2017.
- [5] C. Knabe, R. Griffin, J. Burton, G. Cantor-Cooke, L. Dantanarayana, G. Day, O. Ebeling-Koning, E. Hahn, M. Hopkins, J. Neal, J. Newton, C. Nogales, V. Orekhov, J. Peterson, M. Rouleau, J. Seminatore, Y. Sung, J. Webb, N. Wittenstein, J. Ziglar, A. Leonessa, B. Lattimer and T. Furukawa: "Team valor's escher: A novel electromechanical biped for the darpa robotics challenge," Journal of Field Robotics, vol.34, no.5, pp.912–939, 2017.
- [6] 小島邦生, 唐澤達史, 上月豊隆, 黒岩英則, 柚木崎創, 岩石智志, 石川達矢, 小山遼, 野田晋太郎, 植田亮平, 菅井文仁, 野沢峻一, 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸: "高速大出力ヒューマノイドの研究用プラットフォーム JAXON の開発", 日本ロボット学会誌, vol.34, no.7, pp.458–467, 2016.
- [7] 米本恭三, 石神重信, 近藤徹: "関節可動域表示ならびに測定法", リハビリテーション医学, vol.32, no.4, pp.207–217, 1995.
- [8] Y. Kakiuchi, K. Kojima, E. Kuroiwa, S. Noda, M. Murooka, I. Kumagai, R. Ueda, F. Sugai, S. Nozawa, K. Okada and M. Inaba: "Development of humanoid robot system for disaster response through team nedo-jsk's approach to darpa robotics challenge finals," 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.805–810, 2015.
- [9] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoi, H. Saito, K. Harada, K. Kaneko and H. Hirukawa: "The first human-size humanoid that can fall over safely and stand-up again," Proc. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), vol.2, pp.1920–1926, 2003.
- [10] F. Kanehiro, K. Fujiwara, H. Hirukawa, S. Nakaoka and M. Morisawa: "Getting up motion planning using mahalanobis distance," Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2540–2545, 2007.
- [11] S. Kajita, R. Cisneros, M. Benallegue, T. Sakaguchi, S. Nakaoka, M. Morisawa, K. Kaneko and F. Kanehiro: "Impact acceleration of falling humanoid robot with an airbag," 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.637–643, 2016.
- [12] J. Lee, W. Choi, D. Kanoulas, R. Subburaman, D.G. Caldwell and N.G. Tsagarakis: "An active compliant impact protection system for humanoids: Application to walk-man hands," 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.778–785, 2016.
- [13] S.-H. Lee and A. Goswami: "Fall on backpack: Damage minimization of humanoid robots by falling on targeted body segments," Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol.8, no.2, 021005-1–021005-10, 2012.
- [14] S.K. Yun and A. Goswami: "Tripod fall: Concept and experiments of a novel approach to humanoid robot fall damage reduction," 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2799–2805, 2014.
- [15] K. Fujiwara, S. Kajita, K. Harada, K. Kaneko, M. Morisawa, F. Kanehiro, S. Nakaoka and H. Hirukawa: "An optimal planning of falling motions of a humanoid robot," 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.456–462, 2007.
- [16] K. Ogata, K. Terada and Y. Kuniyoshi: "Real-time selection and generation of fall damage reduction actions for humanoid robots," Humanoids 2008—8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.233–238, 2008.
- [17] L. Meng, Z. Yu, X. Chen, W. Zhang, M. Ceccarelli, K. Hashimoto, A. Takanishi, Q. Huang, W. Guo, L. Xie and H. Liu: "A falling motion control of humanoid robots based on biomechanical evaluation of falling down of humans," 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.441–446, 2015.
- [18] S. Ha and C.K. Liu: "Multiple contact planning for minimizing damage of humanoid falls," 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.2761–2767, 2015.
- [19] V. Samy and A. Kheddar: "Falls control using posture reshaping and active compliance," 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.908–913, 2015.
- [20] S. Nakaoka: "Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated gui framework," 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp.79–85, 2012.

垣内洋平 (Yohei Kakiuchi)

2000 年東京大学工学系研究科機械情報工学専攻修士課程修了。同年三菱重工業 (株) 入社。2012 年東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。博士 (情報理工学)。2012 年同大学特任助教, 2014 年特任講師, 2018 年特任准教授となり現在に至る。ロボットシステムのインテグレーション, ヒューマノイドロボットによる屋外作業支援の研究に興味を持つ。
(日本ロボット学会正会員)

掃部雅幸 (Masayuki Kamon)

1996 年慶應義塾大学大学院修士課程機械工学専攻修了。1997 年川崎重工業株式会社に入社。慶應義塾大学大学院社会人博士課程にて, 2003 年工学博士号取得。ロボットマニピュレータの性能解析, 新機構開発, 機械装置の最適設計等に従事。

下村信恭 (Nobuyasu Shimomura)

1986 年大阪大学工学部電気工学科学士課程修了。同年川崎重工業（株）入社。2015 年川崎重工業（株）精密機械・ロボットカンパニーロボットビジネスセンター技術総括部イノベティブロボット部部長、現在に至る。アーク溶接、パレタイス、半導体などの産業用ロボットの開発を経て、現在、将来製品の

開発に従事。

野沢峻一 (Shunichi Nozawa)

2013 年東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。博士（情報理工学）。2013 年同大学助教，2016 年特任講師。2010～2013 年まで日本学術振興会特別研究員。ヒューマノイドロボットによる全身物体操作の研究に従事。

（日本ロボット学会正会員）

稲葉雅幸 (Masayuki Inaba)

1981 年東京大学工学部機械工学科卒業。1986 年東京大学大学院情報工学専門課程博士課程修了（工学博士）。1986 年東京大学講師，助教授を経て，2000 年教授。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所属。知能ロボットシステムの研究教育に従事。日本機械学会，計測自動制御学会

等。

（日本ロボット学会正会員）

柚木崎創 (Sou Yukizaki)

2017 年東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。2017 年川崎重工業（株）に入社し現在に至る。ヒューマノイドロボットの設計開発・評価業務に従事。

岡田 慧 (Kei Okada)

1997 年京都大学工学部情報工学科卒業。2002 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。博士（工学）。2002 年東京大学大学院情報理工学系研究科科学技術振興特任教員。2006 年同特任講師。2009 年同准教授，2018 年同教授となり現在に至る。ヒューマノイド統合システム，オープンソースロボティクス，長期記憶双腕ロボットシステム，学習認識双腕マニピュレーションに興味を持つ。

（日本ロボット学会正会員）