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

小 島 邦 生^{*1} 唐 澤 達 史^{*2} 上 月 豊 隆^{*2}
 黒 岩 英 則^{*2} 柚木崎 創^{*2} 岩 石 智 志^{*2}
 石 川 達 矢^{*2} 小 山 遼^{*2} 野 田 晋太郎^{*2}
 植 田 亮 平^{*2} 菅 井 文 仁^{*2} 野 沢 峻 一^{*2}
 垣 内 洋 平^{*2} 岡 田 慧^{*2} 稲 葉 雅 幸^{*2}

Development of High-Speed and High-Power Humanoid Research Platform JAXON

Kunio Kojima^{*1}, Tatsushi Karasawa^{*2}, Toyotaka Kozuki^{*2}, Eisoku Kuroiwa^{*2}, Sou Yukizaki^{*2}, Satoshi Iwaishi^{*2}, Tatsuya Ishikawa^{*2}, Ryo Koyama^{*2}, Shintaro Noda^{*2}, Ryohei Ueda^{*2}, Fumihito Sugai^{*2}, Shunichi Nozawa^{*2}, Yohei Kakiuchi^{*2}, Kei Okada^{*2} and Masayuki Inaba^{*2}

This paper presents the development of high-speed and high-power humanoid robot research platform JAXON. Researchers have studied humanoid robots widely and people expect humanoid robots to help various tasks such as housework, entertainment, and disaster-relief. Therefore it is important to develop humanoid research platform available in various fields. We considered the following as design requirements necessary to utilize humanoids for various uses. 1) Robots have humanlike body proportion to work in infrastructure matched to human body structure. 2) Robots have the same degree of physical performance as humans. 3) Robots have energy sources such as batteries and act without tethers. 4) Robots walk with two legs or four limbs and continue to work without fatal damage in unexpected rollover. JAXON satisfied these requirements. Then we demonstrate the performance of JAXON through the experiment of getting out of a vehicle, stepping over walls, squatting with heavy barbells, walking with four limbs, and operating on batteries. Further more, we assess the performance of the strong armor and the shock absorbing structure through a backward over-turning accident.

Key Words: Humanoid Robot, Mechanical Design, Research Platform

1. 序 論

1973年に早稲田大学で世界初の等身大人型ロボット WABOT-1 [1] が開発されてから、1996年に発表されたP2 [2] が火付け役となり、数々のヒューマノイドが開発されてきた。それらのロボットはそれぞれ優れた特徴を有しており、様々な分野への応用が期待されている。しかし、ヒューマノイドロボット研究の深化と展開を考えると、特定の優れた性能を有するだけでなく展開容易性（研究用プラットフォームとして様々な実験に容易に

適用できること）を有することが重要である。筆者らが大出力等身大ヒューマノイドとしてこれまで開発してきたSTARO [3] も高速大トルク軸駆動システムによる高い運動性能を持っていたが、様々な分野への展開性を考慮すると予期せぬ転倒時に破損する可能性がある、外部給電なしでは活動できないなどの課題があった。そこで本研究では後に幅広い分野へ展開することを考慮した高速大出力ヒューマノイド研究用プラットフォームのための設計仕様を決定し、それらを実現できるよう STARO をプロトタイプとして JAXON (Fig. 1) を設計・開発した。

本論文では第2章で関連論文と展開容易性を有する研究用プラットフォームの設計仕様について述べ、第3章で JAXON の詳細設計について報告し、第4章でその設計仕様の検証のために実施した動作実験を示す。本論文のみで展開容易性を多面から評価するのは困難であるため、限定的ではあるが展開容易性を実現するための設計仕様に直接的にかかわる内容の検証実験を第4章で示す。より具体的に様々な動作に適用している例は [4]~[8] などと今後の論文を参照されたい。

原稿受付 2016年1月28日

^{*1} 東京大学大学院学際情報学府

^{*2} 東京大学大学院情報理工学系研究科

^{*1} The University of Tokyo, Graduate School of Interdisciplinary Information Studies

^{*2} The University of Tokyo, Graduate School of Information Science and Technology

■ 本論文は有用性（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。

2. 関連研究と JAXON の設計仕様と有用性

2.1 関連研究

これまで数々のヒューマノイド研究用プラットフォームが開発されてきた [9]~[13]. 早稲田大学は WABOT-1 [1] を開発した後, WABIAN-2R [9] により膝を伸ばした人間らしい歩行を実現している. ホンダは 1996 年に世界初の自立 2 足歩行ヒューマノイドロボット P2 [2] を開発して以来, 小型化と運動性能の向上を図り, 歩行のみならず跳躍や走行などの高い運動性能を誇る ASIMO [14] を開発した. また, 「人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクト (HRP)」において産業技術総合研究所が開発した HRP-2 [11] は世界で 20 体程度が利用されており, 2000 年代のヒューマノイド研究の牽引力となった. 韓国の KAIST は KHR-2 や HUBO 等の開発を行っており [10], それらの後継モデルは走行することもできる [15] [16].

現在ではこのような研究用プラットフォームだけでなく生活支援やエンターテインメントなど様々な分野に対応したヒューマノイドも開発されている [17]~[19]. 特に HRP-4C は見た目とプロポーションが非常に人間に類似している点で特徴的である. また, 人間の生活環境だけでなく人間の近づけない災害現場などで作業できるヒューマノイドロボットの開発も期待されている. ボストン・ダイナミクスが PETMAN [20] をプロトタイプとして開発した ATLAS もそのようなロボットの一つであり, 大出力の油圧駆動と高い転倒衝撃耐性が特徴である.

Fig. 1 Appearance of JAXON1 and JAXON2

2.2 JAXON 開発の目的と四つの設計仕様

ヒューマノイドロボットは家事支援や医療・介護支援, エンターテインメントや災害現場支援など広い分野で活躍することが期待されており, 2.1 節で述べたとおりこれまで数々のヒューマノイドロボットが開発されている. おおのこのロボットはそれぞれ高い運動性能や人に近いプロポーション, 転倒衝撃耐性など特定の優れた特徴を有している. しかし, 様々な分野へ展開するために必要な要素を複数併せ持つものは少なく, 後の展開容易性を考慮した研究用プラットフォームとして実用的な水準に達しているものはほとんどなかった.

そこで本研究では様々な分野へ展開する際に共通して必要な要素を考慮した結果, ヒューマノイド研究用プラットフォームのハードウェア設計仕様として以下の四つを定めた.

- (1) 人間の身体構造にマッチした環境・インフラで活動するため人に近いプロポーションであること [11]
- (2) 人間と同程度の運動性能を有すること
- (3) 外部からの給電ではなく, バッテリー等を本体に搭載しスタンドアローンな状態で動けること
- (4) 移動が困難な環境において 2 足歩行や 4 足歩行などが行え, 万一転倒しても致命的な破損を防ぎ動作が続けられること

設計仕様 (1) (2) を満たすことでヒューマノイドは人間と同等の身体構造と関節トルク・関節角速度を有することになる. これに加えハンドと足平, 頭部の視覚センサ等を用途に応じて変更できるように設計することで人間が行うタスクと同等の実験に適用できるようになると考えた. 設計仕様 (3) (4) はより容易に様々な実験を遂行できるための条件として追加した.

これまで開発されてきたヒューマノイドと設計仕様の充足度をまとめたものを Table 1 に示す. 設計仕様 (1) については日本人人体寸法データベース [25] の青年男子の統計値と比較することで評価した. 肩幅と上腕・前腕の長さ, 膝関節・股関節・肩関節の高さを身長で正規化した値に関して各ヒューマノイドの青年男子平均値に対する誤差率を求めた. JAXON と青年男子平均の値をまとめたものを Table 2 に示す. JAXON はすべて 6% 未満であるのに対し, 肩幅の誤差率をとっていても HRP-4C 以外のヒューマノイドはそれぞれ WABIAN-2R が 19.8%[†], ASIMO が 12.5%[†], HRP-2 が 39.7%[†], HUBO が 17.3%[†], ATLAS が 33.3%[†], STARO が 148.8% と青年男子平均値から大きく外れ

Table 1 Comparison among previous humanoid robots
(○:Satisfy the requirement, △:Satisfy partially, ×:Not satisfy)

Robot name	Height [mm]	Weight [kg]	D.O.F.	(1)	(2)	(3)	(4)	Moving speed[km/h]	Knee max torque[Nm]
WABIAN-2R	1,530	64.5	41	△	×	○	×	0.75 [9]	150.9 [21]
ASIMO	1,200	43	26	△	—	○	×	10 [22]	—
HRP-2	1,539	58	30	△	△	○	△	2.5 [11]	168.3 [23]
HRP-4C	1,580	43	42	○	×	○	×	0.867 [24]	≤ 168.3 [17]
HUBO	1,250	55	41	△	—	○	×	3.24 [16]	—
ATLAS	1,800	150	30 ^{††}	△	○	○	○	7.2 [20]	—
STARO	1,808	90	33 ^{††}	△	○	×	×	1.58	500.0
JAXON	1,880	127	33 ^{††}	○	○	○	○	1.58	679.9

[†] 詳細データが不明なため写真等から推定

^{††} Without hands

^{†††} Japanese male data [25]

Table 2 Proportion comparison with statistical value

Body part	Ratio to body height JAXON	Statistic ^{†††}	Error ratio[%]
Body height	1	1	0
Shoulder width	0.230	0.233	-1.13
Upper arm length	0.171	0.181	-5.54
Lower arm length	0.145	0.141	2.64
Shoulder height	0.789	0.806	-2.13
Crotch height	0.480	0.507	-5.37
Knee height	0.279	0.274	1.70

ていた。Table 1 では青年男子平均値からの誤差率が $\pm 10\%$ に収まっていることを設計仕様 (1) の判定基準とした。ただし、HRP-4C に関しては日本人青年女性の平均値の $\pm 10\%$ に収まること目標としており [17]、これにより設計仕様 (1) を満たすこととみなした。設計仕様 (2) については移動速度と関節駆動トルク等から評価した。各ヒューマノイドの移動速度と膝関節の最大トルクを Table 1 の右 2 列に示す。1 [km/h] より速く移動できかつ膝関節の最大トルクが 500 [Nm] 以上であることを Table 1 では設計仕様 (2) の判定基準とした。ただし、ATLAS に関しては関節最大トルクが不明であったが、先行機の PETMAN の積載重量 23 [kg] と体重 80 [kg] [20] より 500 [Nm] 以上と推定した。このように四つの設計仕様をすべて満足するロボットはこれまで開発されていない。本研究ではこれらを満たせるように JAXON を開発することを目標とした。

2.3 JAXON 開発の難点

上記の四つの要素を併せ持つロボットを開発することは容易ではない。例えば高い運動性能を有するためには大きなアクチュエータや減速機が必要になるが、人に近いプロポーションを実現するためには大きなアクチュエータ等を狭い空間に収納しなければならない (空間的課題)。また、スタンドアロンな状態でも活動できるように重いバッテリーを搭載しなければならないが、結果、転倒時には大きな衝撃に耐えなければならない (重量的課題)。このように互いに相反する要素を併せ持つロボットを開発することは非常に困難である。本研究では空間的な課題に対しては小型化と空間の有効活用により、重量的課題に対しては衝撃吸収構造の導入により相反的な複数の設計仕様を満たせるように工夫した。

3. JAXON の設計仕様と詳細設計

本章では四つの設計仕様についてそれぞれ 3.1 節, 3.2 節, 3.3 節, 3.4 節で説明する。

JAXON の名称は四つの設計仕様にも由来しており

- J : JSK : 情報システム工学研究室
- A : Anti-impact armor : 耐衝撃性外装
- X : Extreme-power system : 高速大出力システム
- O : Optimal proportion : プロポーションが良い
- N : Neon genesis humanoid : 新世紀ヒューマノイド

の頭文字からとられている。また、その読みは世界に有名なダンサー Michael Jackson になぞらえており、彼のようなダイナミックでキレのある身体動作ができるようにとの意味も込められている。

JAXON はアクチュエータとして Maxon 製 200W モータ、減速機としてハーモニックドライブを搭載しており、全関節を関節位置により制御する。センサについては手先と足先に六軸力センサ、体幹リンクに加速度センサとジャイロセンサを、頭部には Multi-sense を搭載している。また、ハンドと足平、頭部の視覚センサは用途に応じて変更できるように容易に交換可能な設計となっている。

[†] Ratcheting torques of harmonic drive reducer

^{††} Torques calculated from the current limit of motor driver system

3.1 人間に近いプロポーションと関節配置

Fig. 1 に大出力等身大ヒューマノイド JAXON1 と JAXON2 の外観を示す。JAXON1 と JAXON2 において異なるのはカラーリングだけではなく回路や設計にも細かな差があるが、性能や構造等に大きな仕様の違いはない。また、JAXON の基本仕様を Fig. 2, Table 3 に示す。JAXON は身長 1,880 [mm]、体重 127 [kg] で脚、腕、体幹、首がそれぞれ 6 自由度、8 自由度、3 自由度、2 自由度の合計 33 自由度である。

大出力のヒューマノイドは一般に高トルクを出力するために大きなアクチュエータや減速機が必要となるため、人間のプロポーションからかけ離れた身体構造になりやすい。実際、我々が以前開発した STARO のプロポーションは決して人間に近いものではなかった。しかし、本研究で我々は以下の三つのポイントによって大出力かつ人間に近いプロポーションを実現した。

Fig. 2 JAXON's principal dimensions and joint configuration

Table 3 JAXON's range of joint motion and max torque. Left link range is symmetrical to right link [27].

Limb	Joint number	Range of joint motion [deg]	Max torque [Nm]
Head	15	-32.0 to 30.0	220 [†]
	16	-32.0 to 39.0	
Torso	12	-8.0 to 8.0	574.3 ^{††}
	13	0.0 to 32.0	
	14	-60.5 to 60.5	287.2 ^{††}
Right arm	17	-17.6 to 81.4	220 [†]
	18	-180.0 to 180.0	
	19	-180.0 to -15.8	
	20	-180.0 to 180.0	
	21	-125.5 to 60.0	
	22	-180.0 to 180.0	
	23	-89.0 to 87.0	
	24	-80.0 to 59.0	
Right leg	0	-58.8 to 62.9	220 [†]
	1	-41.5 to 30.0	450 [†]
	2	-121.4 to 45.0	679.9 ^{††}
	3	0.0 to 158.9	
	4	-79.4 to 84.4	220 [†]
	5	-60.0 to 60.0	

Table 4 Comparison among actuator specification, speed reducer specification and necessary torques for stepping over the wall

Joint name	Torques necessary for stepping over the wall[Nm]	Max torques by current limit[Nm]	Harmonic drive type	Ratcheting torques[Nm]
Crotch roll	159.9	544.0	CSD25-160	450
Crotch pitch	429.3	679.9	CSD32-100	1,000
Knee pitch	418.0	679.9	CSD32-100	1,000
Ankle pitch	96.6	408.0	CSD20-160	220
Ankle roll	49.5	342.1	CSD20-160	220

Fig. 3 Comparison between new and old joint unit [27] **Fig. 4** Comparison between new and old motor drivers [27]

ユニット・コンポーネントの小型化

ハーモニック・ドライブを用いた減速機ユニットと水冷式モータドライバの小型化を行った。減速機ユニット、モータドライバともに基本的な性能は変えていない。減速機ユニットの場合は、モータや減速機そのものは変更せず不要な構造材部分を削減することで小型化を行った（**Fig. 3**）。モータドライバの場合は、コネクタの差込口を一辺に統一することでモータの実質的に占める空間を小さくした（**Fig. 4**）。

リンク内の空間の有効活用

モータドライバ等の制御基板はリンクサイズの大きい体幹リンクに配置されることが多いが、大腿・下腿リンクが他の脚腕リンクよりも大きく空間的にも余裕があることに注目し、股関節ピッチ軸と膝ピッチ軸のモータドライバを大腿リンクに、足首2軸のモータドライバを下腿リンクに格納した。これにより股関節ピッチ軸より先端側の関節軸のモータドライバはすべて脚リンクの中に搭載された。

関節配置の調整

STARO では8自由度の腕部を4組の2軸モジュール[26]で構成することで設計の簡略化と低コスト化を図っていた。この2軸モジュールは両持ち軸ユニット（**Fig. 5A**）と片持ち軸ユニットの2種類のユニット（**Fig. 5B**）から構成されている。JAXON では各ユニットの接合部を規格化し2種類のユニットの取り付け方向を自由に選べるようにすることで、設

Fig. 5 Unit mountable in dual direction

計の自由度が高まり関節位置を容易に調整できるようになった（**Fig. 5**）。これにより2軸モジュールを利用しつつ人間に近いプロポーションを有する腕部を実現することができた。以前開発した STARO と異なり JAXON では肩幅、胴体の長さ、脚の長さ等を人間らしい関節位置、リンク長に調整したことで、人間の身体構造にマッチした環境・インフラにおいて有利にタスク動作を行うことが期待される。

3.2 高速大トルク軸駆動システムと広い可動域

3.2.1 高速大トルク軸駆動システム

膝関節と股関節ピッチ軸には浦田らの高速大トルク軸駆動システム[28]を用いた液冷ダブルモータユニット[3]を、体幹ロール・ピッチ関節には空冷ダブルモータユニットを備えている。モータの内部温度を推定し制限温度を超えないように出力電流を制限することでモータの焼損を防ぎながらモータの本来の性能を引き出している[28]。また、モータを水冷することで更なる出力の向上を実現しており、空冷モータの約4倍の電流を連続して流すことが可能になる[29]。膝関節と股関節ピッチ軸には水冷ダブルモータを用いている。

リンク長・減速機の選定法

脚部は以下のような手順でリンク長と減速機を決定した。

- (1) 車[†]の座面の高さから脚部の各リンクの長さを決定
- (2) 段差上り動作シミュレーションにより必要トルクを計算
- (3) アクチュエータの性能と必要トルクから減速機を選定

高さ770[mm]の車のシートに半身が座った状態で車の外側の脚を伸ばして脚が地面に届く長さとして、大腿リンクと下腿リンクの長さをともに380[mm]とした。段差上り動作のシミュレーションにより求めた必要トルクを**Table 4**の左端のカラムに示す。またモータドライバの電流制限、モータのトルク定数からモータドライブシステムの最大トルクを計算したものを**Table 4**の左から2列目に示す。股関節ピッチ軸と膝関節はその必要トルクから液冷ダブルモータユニットを用い、その他の軸は空冷シングルモータとした。また、減速機に関してはハーモニックドライブのラチェティングトルク（**Table 4**）から股関節ピッチと膝関節はCSD32-100を、股関節ロール軸はCSD25-160、

[†]Polaris RANGER at DARPA Robotics Challenge (DRC の Drive タスクと Egress タスクにて使用された)

Fig. 6 Cross section view of elbow joint

その他の軸はCSD20-160を用いた。

また、STARO ではうつ伏せに寝た姿勢から手を使って立ち上がるといった動作は体幹の関節許容トルクの制約により困難だったため、JAXON では体幹の3軸のすべてにCSD32-160を用い、体幹ロール軸とピッチ軸には自然空冷ダブルモータを採用している。

アブソリュートエンコーダを備えた関節構造

Fig. 6 に肘関節の構造を示す。各関節の駆動部分は主にモータ、プーリ・ベルト減速機、ハーモニックドライブ、磁気／電気誘導式アブソリュート・エンコーダ（262144 パルス）から構成されている。アブソリュート・エンコーダとは別に光学式インクリメンタル・エンコーダ（500 パルス）がモータに装着されている。ロボットが定常動作する際にはインクリメンタル・エンコーダを用いて各関節の角度制御を行い、アブソリュート・エンコーダはシステム起動時に初期関節角度を計測するために用いる。減速機にハーモニックドライブを用いるロボットでは関節に過度なトルクがかかった際にサーキュラスプラインとフレクスプラインの歯の噛み合いがずれてしまうことがある。このラチェッティング現象が起きた際、実際の関節角度とインクリメンタル・エンコーダで計測できる関節角度の間にずれが生じるのでロボットが動作を継続するのは困難になる。一方、アブソリュート・エンコーダは二つのリンク間の角度を直接計測しているため、実際の関節角度との間にずれは生じない。そこでJAXON ではラチェッティング現象が起きた際にアブソリュート・エンコーダで計測される関節角度を反映することで、その後も動作を継続できるようになっている。両エンコーダの値は常に読み込まれるが、平常時に関節角度制御に反映されるのはインクリメンタル・エンコーダの値のみである。二つのエンコーダで検出される角度差が一定以上になったときにラチェッティング現象を検出し、アブソリュート・エンコーダの値を関節角度に反映する。アブソリュート・エンコーダの値を関節角度制御に常に利用しないのは、アブソリュート・エンコーダとモータの間に存在する減速機の剛性を考慮しなければならない上に、減速比とノイズを考慮するとアブソリュート・エンコーダの実質的な分解能が関節角度制御をするには不十分であるためである。

3.2.2 広い可動域

JAXON の腕部は8自由度（襟1軸、肩3軸、肘1軸、手首3軸）であり2自由度の冗長性があるため、エンドエフェクタの到達範囲が非常に広い。このことはHRP-2のReachability

Fig. 7 Comparison of reachability map between JAXON and HRP-2

Fig. 8 JAXON's crossing leg posture [27]

Table 5 Specification of batteries [27]

Name	1 cell voltage[V]	1 cell capacity[Ah]	Parallel number	Series number	Voltage [V]	Capacity [Ah]
12V battery	3.3	15	1	4	13.2	15
72V battery	3.3	2.5	1	22	72.6	2.5

Map との比較からも明らかである (Fig. 7)。

股関節や足首関節、手首関節はロール・ピッチ・ヨーの3軸を直交に配置することが多いが、JAXON では可動域を確保するために手首関節 (Fig. 2 (a))、股関節 (Fig. 2 (b))、足首関節 (Fig. 2 (c)) のロール軸とピッチ軸の位置を少しずらしている。

また、脚に関しては大出力でありながらスマートな形に収めることで Fig. 8 に示すように脚を交差することもできるので、フットステップの自由度が向上しバランス制御に大きく貢献することが期待される。

3.3 バッテリによるスタンドアローンなシステム

JAXON はSTARO と異なりバッテリーと無線ルータを搭載することでゼーレスでも稼働が可能になっている。JAXON が搭載しているLiFe バッテリーの仕様を Table 5 に示す。モータ駆動用に72V バッテリーを3個、制御基板駆動用に12V バッテリーを3個、PCや水冷ポンプ、その他デバイス用に12V バッテリーを2個搭載している。JAXON が一般的なタスク動作で1時間稼働できるように、また各システムのバッテリー残量がおおむね均一に減少するように、それぞれのバッテリーの搭載個数および配分を決定した。

3.4 転倒に備えた外装と衝撃吸収構造

ヒューマノイドは自らの脚でバランスを保って動作するため非常に転倒しやすく、不整地走破や転倒回避のために様々な研究が行われているが[24][30]～[32]、転倒を回避しきれない場合

もある。そこで予期せぬ転倒での衝撃に耐えられるような身体構造を採用することにした。

ヒューマノイドでの予期せぬ転倒に対応する先行研究としては制御により転倒衝撃を緩和したり特殊な外装により破損を防いだりした例 [33]～[36] が挙げられる。本研究では何らかのトラブルでロボットのシステムが停止した際にも致命的な破損を防ぐために制御ではなく身体構造そのもので転倒衝撃に備えることにした。脚部は上半身と比較して転倒した際の衝撃が小さいので強固な外装により内部を保護することにした。一方、上半身は地面から高い部分にあるので脚部に比べて転倒時の衝撃が大きいため、ただ強固な外装を装備するだけでは関節部などが転倒衝撃を受けて破損する可能性がある。特に JAXON はスタンドアロンな状態でも活動できるようにバッテリーを搭載しているため上半身の重量が大きくその分転倒衝撃も大きくなってしまふ。小林ら [36] はエアバッグのような能動緩衝外装により転倒の衝撃を和らげる機構を提案しているが、本研究では重量や電源、空間の都合上、能動的な機構を装備することは難しいと考え断念した。一方、柔軟な衝撃吸収クッションを取り付けることで転倒の衝撃を和らげることができるが [35], JAXON のような重いロボットの場合、転倒により上半身に加わる衝撃を吸収できるだけの柔軟な外装を外部にとりつけると、放熱性能の低下やマニピュレーションの際に腕とクッションが干渉するといった問題が発生する。そこで、本研究では自動車の衝撃吸収ボディに着目した。自動車では衝突の際にキャビンの空間を維持しつつ、乗員が受ける衝撃を低減するため、車体の前後の緩衝部分で衝撃を吸収し、客室部分には強固で変形しにくいボディ構造を採用している。JAXON の体幹リンクではクッションに加え衝撃吸収ボディを併用することで衝撃を緩和することにした。

脚部の外装

モータやハーモニックドライブ、モータドライバの大部分は強固な大腿リンクと下腿リンクの内部に格納した (Fig. 9)。大腿リンクと下腿リンクは削り出し部品である。また、プーリー部分やモータドライバの側面など設計や組立、メンテナンスの都合で露出している部分はステンレス製とチタン製の強固な外装で保護した (Fig. 9)。

上半身の衝撃吸収構造

JAXON の体幹リンクの衝撃吸収構造を Fig. 10 に示す。関節駆動部、骨格部、電装部等を強固な構造で覆うことで保護しつつ、それ以外の部分を取って変形しやすくすることで転倒時の衝撃を吸収するような構造を採用している。衝撃吸収材は 30 分前後で交換可能である。これにより前後方向に転倒する場合は衝撃吸収素材 (Fig. 10A) が衝撃を吸収することで、関節駆動部や骨格部、電装部等の重要な部分が破損するのを防いでいる。もちろん、能動的な外装や柔軟外装と異なり、変形することで衝撃を吸収するので幾度もの転倒衝撃には耐えられない。そこで本研究では 2 回の転倒衝撃を吸収できることを目標に衝撃吸収構造を設計した。重りの落下による予備実験により 2 回の転倒に相当する衝撃で最大変位量が設定値 (20 [mm]) 以下となるように衝撃吸収構造の強度を決定した。JAXON の設計当初の上半身の目標重量が 40 [kg] であったため、予備実験では衝

Fig. 9 Strong armor in thigh link [27]

Fig. 10 Shock absorbing structure of upper body

Fig. 11 Shock absorbing material's deformation in preliminary experiment

撃吸収材 1 本当たりに相当する 20 [kg] の重りを 1 [m] (目標重心高さ) の高さから 2 回落下させた。2 回の落下実験による衝撃吸収材の変形の様子を Fig. 11 に示す。衝撃吸収材の変形部分 (Support point・Effort point 間) の長さが 30 [mm] の際に 2 回の衝撃での変位が約 15 [mm] であった (1 回めの衝撃の変位量は約 9 [mm])。この結果から衝撃吸収構造の最大許容変位量 20 [mm] に収まる値として変形部分の長さを 30 [mm] と決定した。また、衝撃吸収材がない場合の最大衝撃加速度は 200 [G] 以上 (センサの測定範囲が ± 200 [G]) であったのに対し、衝撃吸収材を用いた場合は約 115 [G] (3 回測定分の平均値) に抑えられていた。

4. JAXON の特徴を活かした動作実験

JAXON の特徴を活かした動作実験として車降り実験、段差上り実験、スクワット動作実験、バッテリー駆動実験、4 足歩行実験、転倒時の衝撃吸収性能評価を行った。

4.1 車降り実験

JAXON の脚の長さを活かして踏み台のような治具を用いずに座面高さ 770 [mm] の車から降りる動作実験を行った。本研

究では人間が複数の中間姿勢を設定し、その間の状態が安定になるように補間することで運転姿勢からの降車動作を生成した。JAXON による車降り動作実験の様子を Fig. 12 に示す。一般にヒューマノイドロボットにとって車内の狭い空間でダッシュボードや front pillar lower との干渉を避けながら降車するのは困難である。STARO の場合、腕や胴体のリンク長が人間と大きく異なるため座席に座らせることさえ困難であった。また、ロボット競技会 DARPA Robotics Challenge (DRC) [37] に出場した ATLAS や HUBO など同型の車から降車または降車できる姿勢で車を運転するために治具を用いていた。一方で、JAXON は治具を用いることなく運転・降車できた。このように JAXON は人に近いプロポーションを有するため他のヒューマノイドよりも様々な実験に容易に適用できることが示唆された。

4.2 段差上り実験

JAXON の高速大トルク駆動システムの脚の高い速度・トルク性能を示すため、段差上り実験を行った。本研究ではフットステップと足先位置・姿勢、ZMP、重心高さの軌道等を与えて、動力学的バランスを維持できるように重心軌道を生成し、重心ヤコビアンにより全身軌道を計算している。JAXON による段差上り動作実験の様子を Fig. 13 に示す。最高で約 2.5 [s] で 400 [mm] の段差を上ることができた。また、段差上り動作時の振り上げ脚の各関節の電流値から計算したトルク値を Fig. 14 に示す。グラフから膝関節において最大で約 600 [Nm] のトルクが必要であることが分かる。16.7 [s] のスパイクは左右脚の踏み変え時における歩行安定化制御 [5] による足裏反モーメント分配の影響と考えられる。

4.3 スクワット動作実験

JAXON の高速大トルク駆動システムの高いトルク性能を検証するために、80 [kg] のバーベルを 6 秒間で 300 [mm] 上下さ

Fig. 12 Getting out experiment from vehicle by JAXON [27]

Fig. 13 Experiment of stepping over wall by JAXON: Wall is 400[mm] high [27]

せるスクワット動作を行った (Fig. 15). JAXON の重量と合わせて全体重量は約 210[kg] である。39 回のスクワット運動を行った後に空冷である肩関節のモータの内部推定温度が 120°C に到達したため、温度制限により実験を終了した。

実験時の膝関節と肘関節の電流値 (実測値)、モータ外部温度 (実測値)、モータ内部温度 (推定値) を Fig. 16 に示す。腕部で最も負荷の高い肘関節は定常的に約 12 [A] の電流がかかっており関節トルクに換算すると約 113 [Nm] に相当する。一方、脚部で最も負荷の高い膝関節では、定常的には 1 モータあたり約 7 [A]、最大で約 35 [A] の電流が流れている。関節トルクに換算するとそれぞれ約 69 [Nm] と約 344 [Nm] に相当する。肘関節 (空冷モータ) と膝関節 (水冷ダブルモータ) では同じモータを用いており同じ条件下での各関節軸のモータの性能は等しい。よってこれらの比較から水冷による強制冷却の有用性が確認できる。また、JAXON の高速大トルク軸駆動システムではモータの内部温度を推定し制限温度を超えないように出力電流を制限しているため、このようなモータに非常に大きな負荷が掛かるような動作を行ってもモータの焼損を防ぐことができる。

Fig. 14 Torques estimated from motor current during stepping over wall

Fig. 15 Experiment of squatting with 80 [kg] weight: Total weight of body and barbell is about 210 [kg]

Fig. 16 Motor current and temperature while squatting

Fig. 17 Transition of battery voltage: The sudden changes of voltage is due to switching emergency stop [27]

Fig. 18 Experiment of four leg walk

4.4 バッテリ駆動実験

実際にバッテリーのみで稼働することにより活動限界時間を計測した。バッテリーの電圧変化の推移を **Fig. 17** に示す。バッテリーのみのテザーレス状態で不整地歩行や階段上りといった移動タスクやドリルによる穴あけ動作やバルブ回し動作といったマニピュレーションタスクを約 75 分間行うことができた。

4.5 4 足歩行実験

JAXON の高い走破性を示すため、不整地を 4 足歩行で移動する実験を行った。JAXON による 4 足歩行実験の様子を **Fig. 18** に示す。床には高さ 50 [mm] 程度の複数種類の物体をランダムに配置した。ロボットには床に配置した物体に関する情報を与えずに平らな床面を想定した動作を実行しており、4 足歩行により環境に対してロボストに移動ができることが分かる。

4.6 転倒時の衝撃吸収性能評価

JAXON が実際に転倒した際の衝撃吸収構造の変形具合を確認することで、衝撃吸収構造の性能を評価した。JAXON が実際に後方に転倒した際の様子を **Fig. 19** に示す。モータドライバの通信エラーにより脚部がサーボオフ状態となり、その他の軸はサーボオンのまま転倒したと考えられる。後方転倒により衝撃吸収構造が変形した様子を **Fig. 20** に示す。後方に転倒し後ろ側から力を受けたことで衝撃吸収構造が変形し背中中のバックパックが前側に約 10 [mm] ずれていることが分かる。予備実験の 1 回めの衝撃で衝撃吸収材が約 9 [mm] 変形していたことと比較して設計時の想定に近い大きさの衝撃力が加わったと考えられる。一方、関節駆動部や骨格部、電装部等の重要な部分は破損しておらず、転倒後一切のハードウェアの修復を行うことなくシステムを再起動することで階段上り動作を遂行するこ

Fig. 19 JAXON's backward over-turning [27]

Fig. 20 Deformation of shock absorbing structure by backward over-turning (side view) [27]

とができた。このことから衝撃吸収構造が十分にその効力を発揮したことが分かる。しかし、横方向に転倒した際には腕が地面に衝突した衝撃で腕の骨格をなす部品が破断してしまった。JAXON に装備されている衝撃吸収構造は前後方向の転倒衝撃を緩和するだけなので横方向の転倒で破損してしまうのは当然であるが、本研究で提案した衝撃吸収構造をそのまま腕部に適用するのは空間の都合上困難なので転倒の際に腕部を保護することは今後の重要な課題となる。

5. 結 論

本論文では後の展開容易性を考慮した高速大出力ヒューマノイド研究用プラットフォームとして JAXON を開発した。その際、様々な分野へ展開するために共通して必要な要素を考慮し、人間の身体構造にマッチした環境・インフラで活動するため人に近いプロポーションであること、人間と同程度の運動性能を有すること、バッテリー等を本体に搭載しスタンドアロンで動作可能なこと、移動が困難な環境において 2 足歩行や 4 足歩行などが行え、予期せぬ転倒後にも動作を続けられることを四つの設計仕様として定めた。また、JAXON がその設計仕様を満たしているかどうかを検証するために車降り実験、段差上り実験、スクワット動作実験、バッテリー駆動実験、4 足歩行実験と転倒時の衝撃吸収性能評価を実施した。JAXON は研究用プラットフォームとして様々な分野に展開するために必要な要素を有しており、今後のロボット技術の発展に大いに貢献できると期待している。

謝 辞 この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「災害現場支援のための 2 脚 2 腕ロボットシステムの研究開発」の結果得られたものである。

参 考 文 献

- [1] 加藤：“2 足歩行ロボット (WABOT-1) の開発”，バイオメカニズム，

- vol.2, pp.173–214, 1973.
- [2] K. Hirai, et al.: “The development of Honda humanoid robot,” Proc. of The 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp.1321–1326, 1998.
 - [3] Y. Ito, et al.: “Development and Verification of Life-Size Humanoid with High-Output Actuation System,” Proc. of The 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3433–3438, 2014.
 - [4] Y. Ohara, et al.: “Configurable Autonomy Applicable to Humanoid Manipulation in Unstructured and Communication-Limited Environment,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.373–380, 2015.
 - [5] S. Nozawa, et al.: “Multi-Layered Real-Time Controllers for Humanoid’s Manipulation and Locomotion Tasks with Emergency Stop,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.381–388, 2015.
 - [6] R. Ueda, et al.: “Humanoid Integrated UI System for Supervised Autonomy with Massive Data Visualization over Narrow and Unreliable Network Communication for DRC Competition,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.797–804, 2015.
 - [7] I. Kumagai, et al.: “Achievement of Recognition Guided Teleoperation Driving System for Humanoid Robots with Vehicle Path Estimation,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.670–675, 2015.
 - [8] Y. Kakiuchi, et al.: “Development of Humanoid Robot System for Disaster Response Through Team NEDO-JSK’s Approach to DARPA Robotics Challenge Finals,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.805–810, 2015.
 - [9] Y. Ogura, et al.: “Development of a new humanoid robot WABIAN-2,” Proc. of The 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.76–81, 2006.
 - [10] I.-W. Park, et al.: “Mechanical design of humanoid robot platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot 3: HUBO),” Proc. of the 2005 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.321–326, 2005.
 - [11] K. Kaneko, et al.: “Humanoid Robot HRP-2,” Proc. of The 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1083–1090, 2004.
 - [12] K. Nishiwaki, et al.: “Design and development of research platform for perception-action integration in humanoid robot: H6,” Proc. of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.3, pp.1559–1564, 2000.
 - [13] K. Nishiwaki, et al.: “Humanoid ‘JSK-H7’: research platform for autonomous behavior and whole body motion,” Proc. of The Third IARP International Conference on Humanoid and Human Friendly Robotics, pp.2–9, 2002.
 - [14] M. Hirose and T. Takenaka: “Development of Humanoid Robot ASIMO,” Honda R&D Technical Review, vol.13, no.1, pp.1–6, 2001.
 - [15] B.-K. Cho and J.-H. Oh: “Running pattern generation of humanoid biped with a fixed point and its realization,” Proc. of the 2008 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.299–305, 2008.
 - [16] B.-K. Cho, S.-S. Park and J.-H. Oh: “Controllers for running in the humanoid robot, HUBO,” Proc. of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.385–390, 2009.
 - [17] K. Kaneko, et al.: “Cybernetic human HRP-4C,” Proc. of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.7–14, 2009.
 - [18] 高木宗谷: “トヨタパートナーロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.2, pp.208–210, 2006.
 - [19] Y. Kuroki, et al.: “A small biped entertainment robot exploring attractive applications,” Proc. of The 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.1, pp.471–476, 2003.
 - [20] G. Nelson, et al.: “PETMAN: A Humanoid Robot for Testing Chemical Protective Clothing,” Journal of the Robotics Society of Japan, vol.30, no.4, pp.372–377, 2012.
 - [21] Y. Ogura, H. Lim and A. Takanishi: “Development of a Human-like Walking Robot Having Two 7-DOF Legs and a 2-DOF Waist,” Proc. of The 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.134–139, 2004.
 - [22] T. Takenaka, et al.: “Real time motion generation and control for biped robot—2nd report: Running gait pattern generation—,” Proc. of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1092–1099, 2009.
 - [23] 赤地ら: “ヒューマノイドロボット・HRP-2 の開発～人と一緒に働くロボットの設計・製作について～”, 川田技報, vol.23, pp.20–25, 2004.
 - [24] S. Kajita, et al.: “Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking,” Proc. of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4489–4496, 2010.
 - [25] 河内まき子, 持丸正明, 岩澤洋, 三谷誠二: “日本人人体寸法データベース 1997-98”, 通商産業省工業技術院くらしと JIS センター, 2000.
 - [26] 中岡ら: “小型大出力モータドライブ系による駆動力・即応性を備えた等身大ヒューマノイド用アームの設計と実装”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 4K1-1, 2012.
 - [27] K. Kojima, et al.: “Development of Life-Sized High-Power Humanoid Robot JAXON for Real-World Use,” Proc. of the 2015 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.373–380, 2015.
 - [28] J. Urata, et al.: “Design of High Torque and High Speed leg Module for High Power Humanoid,” Proc. of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4497–4502, 2010.
 - [29] J. Urata, et al.: “Thermal Control of Electrical Motors for High-Power Humanoid Robots,” Proc. of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.205–210, 2008.
 - [30] J. Urata, et al.: “Online walking pattern generation for push recovery and minimum delay to commanded change of direction and speed,” Proc. of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3411–3416, 2012.
 - [31] K. Nishiwaki and S. Kagami: “Frequent walking pattern generation that uses estimated actual posture for robust walking control,” Proc. of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.535–541, 2009.
 - [32] J. Pratt, et al.: “Capture Point: A Step toward Humanoid Push Recovery,” Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on, pp.200–207, 2006.
 - [33] S. Lee and A. Goswami: “Fall on Backpack: Damage Minimizing Humanoid Fall on Targeted Body Segment Using Momentum Control,” ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol.4, pp.703–712, 2011.
 - [34] K. Ogata, K. Terada and Y. Kuniyoshi: “Real-time selection and generation of fall damage reduction actions for humanoid robots”, Proc. of the 2008 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.233–238, 2008.
 - [35] 藤原ら: “等身大ヒューマノイドロボットの後方転倒制御の実現”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.4, pp.427–434, 2005.
 - [36] 小林一也: “再装填機構を備えた能動緩衝外装を持つ等身大ヒューマノイドの実現に関する研究”, PhD thesis, 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻, 2014.
 - [37] Defense Advanced Research Projects Agency: DARPA DRC, 2015.

小島邦生 (Kunio Kojima)

2015 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。同年東京大学大学院情報科学府学際情報学専攻博士課程入学。2015 年 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award (IROS2015) 受賞。Best Oral Paper Award および Mike Stilman Best Paper Award Finalist (Humanoids2015)。等身大ヒューマノイドにおける全身ダンス動作制御の研究・大出力ヒューマノイド設計開発に従事。
(日本ロボット学会学生会員)

唐澤達史 (Tatsushi Karasawa)

2014 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。2016 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。

上月豊隆 (Toyotaka Kozuki)

2011 年慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2016 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。筋骨格ヒューマノイド、大出力ヒューマノイド設計開発に従事。

黒岩英則 (Eisoku Kuroiwa)

2014 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。2016 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。

植木崎創 (Sou Yukizaki)

2014 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。大出力ヒューマノイド設計開発に従事。

岩石智志 (Satoshi Iwaishi)

2014 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。2016 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。

石川達矢 (Tatsuya Ishikawa)

2015 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。大出力ヒューマノイド設計開発に従事。

小山 遼 (Ryo Koyama)

2015 年早稲田大学創造理工学部総合機械工学科卒業。同年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程入学。大出力ヒューマノイド設計開発に従事。

野田晋太郎 (Shintaro Noda)

2013 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2015 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。同年同大学情報理工学系研究科創造情報学専攻博士課程入学。等身大ヒューマノイドにおける複雑環境接触全身行動の研究に従事。
(日本ロボット学会学生会員)

植田亮平 (Ryohei Ueda)

2008 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2010 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。同年同大学情報理工学系研究科創造情報学専攻博士課程入学。2016 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻博士課程修了。

菅井文仁 (Fumihito Sugai)

2014 年東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科特任助教となり現在に至る。ヒューマノイドロボットの大出力駆動系の開発に従事。航空宇宙学会、IEEE の各会員。
(日本ロボット学会正会員)

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 年東京大学大学院情報理工学系研究科助教。2016 年同特任講師となり現在に至る。2010 年から 2013 年まで日本学術振興会特別研究員。2012 年 IEEE Robotics and Automation Society Japan Chapter Young Award (ICRA2012) 受賞。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)

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)。2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科特任講師となり現在に至る。等身大ヒューマノイドロボットシステム、ロボットによる家事支援、三次元点群処理の研究に従事。
(日本ロボット学会正会員)

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 年同大学准教授となり現在に至る。ヒューマノイド統合システム、ヒューマノイドプランナ、実時間三次元ビジョンの研究に従事。1999 年第 4 回ロボティクスシンポジウム優秀論文賞、2006 年 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots Best Paper Award 受賞。情報処理学会、IEEE の各会員。
(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。
(日本ロボット学会正会員)