等身大ヒューマノイド型跳躍ロボット用の力学エネルギー
蓄積式直動燃焼アクチュエータの開発*石野 洋二郎^{*1}, 齋 木 悠^{*1}, 柴 田 遼 平^{*2}
大澤 明日菜^{*3}, 前 田 一 樹^{*3}, 大 岩 紀 生^{*1}Study on a Combustion Linear Actuator with a Mechanical Energy
Accumulation for a Driving System of Full-Scale Jumping RobotYojiro ISHINO^{*4}, Yu SAIKI, Ryohei SHIBATA,
Asuna OSAWA, Kazuki MAEDA and Norio OHIWA^{**}Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

In recent years, athletic humanoid robots have been popular, but the electrical motors equipped in their joints and heavy batteries do not allow them the more quick actions. Another type of actuators of light, compact and no-auxiliary, are required to bring them more quick motion. In this study, novel combustion linear actuator, which stores once a combustion driving force to springs as mechanical energy, was developed. First, a high-speed direct observations of the combustion behavior in a model constant volume chamber was carried out for a high performance combustion condition. Second, to verify the performance of the actuator for heavy load, an operational test of lifting was made. The test showed the successful lift performance for 27 kg mass per an unit. Prototype model of full-scale jumping robot, which is planed to be driven by the actuators, is also shown in this paper.

Key Words: Premixed Combustion, Flow Visualization, Actuator, Humanoid, High Speed Photography, Lenoir Cycle, Ignition, Jumping Robot

1. 結 言

本研究では、燃焼の利用範囲の拡大を目指して、等身大ヒューマノイド型跳躍ロボットの跳躍駆動用に利用可能な、ピストン・シリンダ式の燃焼アクチュエータの開発を行う。ただし、通常、シリンダ内の燃焼ガスは急速に冷却するため、等身大ヒューマノイドロボットの跳躍時間を待たずして、シリンダ内燃焼ガス圧力が低下してしまう。そこで、燃焼圧力を一旦バネに力学エネルギーとして蓄積し、燃焼ガスの冷却に無関係にエネルギーを利用できる力学エネルギー蓄積式直動燃焼アクチュエータを考案し、製作を行った^(1, 2)。本報では、試作アクチュエータの性能試験として、はじめに、定容燃焼室内の可視化観察から火炎の燃焼挙

Fig. 1 The design of the proposed combustion linear actuator with mechanical energy accumulation

* 原稿受付 2009年6月22日.

^{*1} 正員, 名古屋工業大学大学院工学研究科(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町).

^{*2} 学生員, 名古屋工業大学大学院工学研究科.

^{*3} 名古屋工業大学大学院工学研究科.

E-mail: ishino@nitech.ac.jp

動および定容容器での圧力変動を把握し、つぎに、重量物の高速吊り上げ駆動実験を行った。

2. 実験装置および実験方法

2・1 力学エネルギー蓄積式直動燃焼アクチュエータ 力学エネルギー蓄積式直動燃焼アクチュエータの概要図を図1に、重量物の吊り上げ実験装置の系統図を図2に、それぞれ示す。

供試アクチュエータは、主として、シリンダ (1)、ラチェット内蔵コンロッド付きピストン (2)、およびバネ (3) から構成される。本アクチュエータの人工筋肉として使用に配慮し、燃焼室を中央にコンロッドが貫通した特殊な形状とすることで、作動時に全長が収縮する動作を実現した。アクチュエータの寸法は、等身大モデルロボットの大腿部への収納を想定し、燃焼室直径を72.3 mm、燃焼室長さを60 mm、全長を約310 mmに設計した。燃焼室体積は234 mlである。

ここで、概要図 (図1) を用いて作動原理の説明を行う。まず、燃焼時に生じる燃焼圧力によりピストン (2) が上昇し、同時にピストンに接続されたバネ固定スライダ (6) およびバネ上端が上昇を始める。このとき、駆動出力下端 (5) には図2のように重量物が接続されるため、バネ下端は瞬間的には上昇せず、一時的に固定された状態となる。一方、ピストンのストローク運動によりバネ上端のみが上昇し、バネの伸長を力学エネルギーとして確保することができる。

ピストンおよびバネ上端は、コンロッドに内蔵されたラチェット機構 (7) および (8) により最大ストローク位置で固定される。その後、伸長したバネにより重量物の高速吊り上げ駆動が実行される。駆動終了後、ラチェット爪 (7) の解除によりピストンは初期位置に戻る。

本アクチュエータにおける燃焼サイクルは、任意のタイミングでの駆動が要求されるため、無圧縮サイクルであるルノアルサイクル⁽³⁾を用いた。

燃焼室筒内に予混合気を充填する方法を次に示す。送風機により空気がスライドバルブ (9) を通して供給される。次にカセットボンベの燃料であるブタンをインジェクター (10) により当量比に応じて量を調節し供給する。これらをモータに接続されたファン (11) により攪拌し予混合気形成される。混合気の着火には、点火電極 (12) 間に生じる点火火花を用い、点火電極から火炎が伝播していくことでアクチュエータが作動を開始する。

本燃焼室形状および燃焼条件から、最大熱効率を与えるバネ定数は15000 N/m程度と見積もられ⁽¹⁾、この

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

とき、バネ伸長量が約54 mm、バネ駆動力として約800 Nの力が得られる。そこで、本アクチュエータのピストン最大ストローク量を約50 mmに設定した。前述のバネ定数を実現するため、本アクチュエータでは、バネ定数2.1 N/mmのバネを9本使用し、上記バネ定数に近い合成バネ定数18900 N/mを形成した。

2・2 燃焼室内可視化用定容燃焼器 本アクチュエータの燃焼現象の可視化のための燃焼室内可視化用定容燃焼器の概要図を図3に示す。この燃焼器は、本アクチュエータの作動直前の状態を模擬しており、インジェクター、ファン (羽寸法: 根元幅7 mm, 最大幅10 mm, 長さ13 mm, 羽枚数: 3枚, モーター駆動, 実測回転数10300 rpm), 点火電極, 圧力センサの配置もアクチュエータと同様に設定されている。ただし、可視化のために、燃焼室底面は厚さ12 mmのガラス板となっている。また、新気の吸入かつ燃焼ガスの掃気は、燃焼器上面に設けた2カ所のネジ穴 (M12) を通して行う。この穴は燃焼作動時には、ボルトで閉鎖する。

燃焼可視化実験の手順を説明する。送風機からの空気によりネジ穴を通して燃焼室内を掃気したのち、ボルトを用いてネジ穴を密閉する。つぎに、カセットボンベ燃料のブタンをインジェクターにより設定当量比に応じた量だけ燃焼室内に供給し、ファンにより攪拌し均一な予混合気を形成する。ファンの回転の停止後100 msで火花点火を行う。点火電極から火炎が伝播していく様子を高速度カメラにより撮影し、圧力センサにより圧力を測定する。

Fig. 3 Appearance of constant volume combustion chamber

2・3 等身大ヒューノイド型跳躍ロボット 本研究では、等身大ヒューノイドロボットの駆動に先立ち、アクチュエータの作動状況を確認するため、バーベル用ウェイト（質量27 kg）の吊り上げ試験を主に行うが、燃焼アクチュエータの設計目的を明確にするため、駆動を計画している等身大ヒューノイド型跳躍ロボットについて記載する。図4に等身大ヒューノイドロボットの初期姿勢の概観図 (a) と系統図 (b) を示す。本ロボットは、総質量約6.6 kg、直立時には全長 約1400 mmであり、跳躍前初期姿勢では全長 約1100 mmとなる。足首と膝関節間の距離は400 mm(e: 下腿部)、膝と股関節間の距離は410 mm (h: 大腿部)、股関節と肩関節間の距離は520 mm (j: 胴)、そして足の長さは260 mmと設計されている。また (f)、(g)、(i) の部材は、本ロボットの跳躍動作を一自由度で行うためのリンクで、それぞれ、約400 mm、約400 mm、約600 mmに設定されている。

次に図4の系統図を用いて作動原理の説明を行う。本アクチュエータ (a: 大腿直筋に相当) の駆動出力上端を大腿部 (b) に、駆動出力下端を下腿部 (c) に、それぞれ接続する。そしてアクチュエータを作動させると駆動出力下端には等身大ヒューノイドロボットによる負荷がかかっているため、バネ下端は急激には移動せず、ピストンストロークによるエネルギーがバネ

(a)

(b)

Fig. 4 Appearance of the humanoid robot

の力学エネルギーとして蓄えられる。ここで、ピストンおよびバネ上端は、2. 1節での説明のように、最大ストローク位置で固定される。その後、バネの収縮運動により駆動出力下端がピストン方向に引かれ、部材

Fig. 5 High speed photography of the constant volume combustion process

(d) (膝蓋骨に相当) を介して運動が下腿部に伝わる。下腿部にはヒラメ筋および腓腹筋に相当する一対の準平行リンク(e)-(f)を設けているため、収縮作動による膝下の運動は1自由度となる。また、この膝下の運動は、平行リンク(g)-(h) (大腿二頭筋および半腱様筋に相当) によって股下の運動として伝わり、これらの力の伝達によりアクチュエータの収縮運動が下肢全体の上昇運動となり、跳躍作動に至る。また、股下の跳躍作動は(i)のリンクにより上部部の腕の振り上げ運動に連動するため、アクチュエータの収縮運動による本ロボットの跳躍動作は全体の系で1自由度として行われる。駆動終了後、ラチェットの解除によりピストンは初期位置に戻る。

3. 結果および考察

3・1 定容燃焼器による可視化実験 定容燃焼器を用い、ファンによる混合気(当量比1.0) 攪拌後100 msで点火し燃焼状態の可視化撮影を行なった。図5に、高速度カメラにより撮影した可視化画像、図6に圧力波形を示す。図5から、燃焼室内での火炎伝播が確認される。すなわち、図5において右下領域(0ms 矢印)に存在する点火電極により点火された火炎核(4ms 矢印)が、6 msおよび8 msにおいて、中心のコロロッドを取り巻くように半時計方向に広がる様子が分かる。これは点

Fig. 6 Pressure variation in a constant volume combustion chamber

火後10 msの図に現れているファンにより誘起されるスワール流による伝播形態である。また、10 m/s程度的高速な火炎伝播速度が得られているが、これは、燃焼ガスの体積膨張、ならびに、ファンによって発生する乱流に起因する。

燃焼室内圧力(図6)については、火炎輝度の増加率が著しい点火後10~13 msにおいて圧力上昇率が最大となり、点火後15 msに最大圧力が記録されている。ただし、点火後15 ms以降、壁面への冷却損失により急速に圧力が低下しており、このことは、本提案アクチュエ

Fig. 7 High speed photography of the operation of the actuator with heavy loading

ータのような力学エネルギー蓄積式ではない通常のピストン駆動系においては、駆動対象に高速動作を望めない場合には、冷却により駆動力が急速に低下することを意味している。

3・2 アクチュエータ単体の性能実験 当量比1.1, バネ定数18900 N/mの条件におけるパーベル用ウェイト (質量27 kg) の吊り上げ実験により、アクチュエータの性能評価を行った。図7に、アクチュエータの吊り上げ作動行程の高速度カメラ撮影画像を示す。表記時刻は点火からの経過時間であり、画像に示した実線は①: バネ上端, ②: バネ下端の初期位置を表し、破線は各位置の時間変位を表している。また、駆動出力下端には重量物が接続されている。ここで、燃焼室内の圧力波形を図8に、撮影画像から計測したバネ上端, 下端の時間変位を図9に示す。点火後、燃焼室内の圧力は急激に上昇し、約14 msで最大圧力0.67 MPaに達することが分かる。つぎに、バネの変位に着目すると、点火後12 msにおいてバネ上端の上昇が開始し、時刻25 msで最大高さ55 mmに到達していることが分かる。バネ上端は図7(b)のように最大高さ到達後、(c)のように2 mm程度の変位の低下が観察されるが、これはピストンが燃焼器上蓋に衝撃する際に緩衝材の反発作用により押し戻された変位であり、それ以降ではバネ上端変位は約53 mmで安定している。これにより、ピストン・コンロッド内に設けたラチェット機構が正常に作用したことが分かる。

一方、バネ下端は時刻26 msで上昇を開始し、バネの

Fig. 8 Pressure variation in the combustion chamber of the actuator

Fig. 9 Displacement of the ends of springs of the actuator

伸長によるエネルギーでウェイトが50 ms程度の時間で吊り上げられていることが分かる。84 ms以降に観察されるバネ下端の大きな振幅は、重量物が起こすバネ下端の振幅作動を捉えたものである。

また、本アクチュエータ作動時の圧力波形が、3. 1節での定容燃焼実験による圧力波形より、最大圧力以降の立下りが速いことが確認される。とくに点火後25 msまでの圧力減少が著しいが、これはピストンの移動による燃焼室体積の増大に起因するものである。点火後25msでピストンが燃焼器上蓋と衝突し、急停止するため、この時刻で燃焼室内圧力の低下速度が不連続を示す。本アクチュエータは、高い燃焼室内圧力の時間帯で主に力学エネルギーを蓄積するシステムであると言えるが、ピストンが停止する時刻の圧力である0.2 kPa程度のゲージ圧力は使用できていない。この圧力を利用するためには、ストロークをより長く変更すれば良いが、伸長したバネ群の反力による圧力に抗する必要があることに、注意を要する。以上のように、等身大ロボットの駆動を想定したウェイトの吊り上げ駆動には50 ms程度を要するのに対して、ピストンが約10 msという短時間で上昇することが確認され、力学エネルギー蓄積機構が有効に作用し、冷却による圧力低下とはほぼ無関係に駆動力を利用することできるシステムが構築されたと言える。

4. 結 言

本研究では、等身大ヒューマノイド型跳躍ロボットの駆動を目的とし、力学エネルギー蓄積式の燃焼直動アクチュエータの設計・製作を行い、燃焼特性および作動特性を把握した。本研究で得られた主な結果を以下に記す。

- (1) 定容燃焼器による可視化燃焼実験より、アクチュエータ内部でのファンの攪拌によるスワール流を伴った燃焼状態が確認された。また、定容燃焼容器内の燃焼では、壁面冷却により燃焼後の容器内圧力が極めて短時間で減少することが分かり、本アクチュエータの力学エネルギー蓄積機能が、長時間の力の作用を必要とする負荷には、必須であることが確認された。
- (2) 本アクチュエータは、27 kgの重量物を50 msの短時間で約50 mm吊り上げる性能を有することが確認された。

文 献

- (1) Maeda, K., Shibata, R., Yamaguchi, T., Ishino, Y., and Ohiwa, N., *Proceedings of the 57th Tokai Branch Regular Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No.083-1 (2008-3), pp.385-386.
- (2) Ishino, Y., Maeda, K., Shibata, R., Osawa, A., and Ohiwa, N., *Exhibition at Techno-Fair 2008 in Nagoya Institute of Technology and Nagoya City University*, (2008-11)
- (3) Murayama, T., and Tunemoto, H., *Engineering of Automobile Engine*, (1999), p.17, Sankaid