高圧コンプレッサと空気圧回生システムを搭載した自立型空気圧駆動ロボット BIRDLEG の開発と跳躍動作実現

Realization of Jumping Movement in Self-contained Pneumatic Robot "BIRDLEG" with High-pressure Compressor and Regenerative Air Pressure System

学　熊倉翔平（農工大）　○正　水内郁夫（農工大）

Shouhei Kumakura, TUAT, kumakura@mizuuchi.lab.tuat.ac.jp
Ikuo Mizuuchi, TUAT

Pneumatic robots have structural softness which is an important element when robots work in living environments of humans. In addition, pneumatics is one of the approaches to realize jumping, running, walking and so on, which are performed by animals and humans. The self-contained pneumatic robot we previously developed has a commercial super-small air compressor, which generates insufficient pressure for dynamic motions such as jumping. To solve this problem we designed and developed super-small high-pressure air compressors. As an additional method of improving the maximum pressure, we tested to increase the intake pressure by using the compressed air stored with a regenerative air pressure system. We verified the efficacy of supercharging. We also developed a self-contained pneumatic robot BIRDLEG with the new super-small high-pressure compressor and the regenerative air pressure system. We verified the validity of the design concept for self-contained pneumatic robots by realization of jumping on BIRDLEG without any external air pressure source.

Key Words :Pneumatic Robot, Embedded High Pressure Compressor, Regenerative Air Pressure

1.　緒言

空気圧人工筋肉が持つ特徴として，アクチュエータそのものが持つ弾性や，重量あたりの出力の高さが挙げられる．これらの特徴を活用して，跳躍 [1]・走行 [2][3] あるいは歩行 [4][5] などを実現する高い運動機能を持ったロボットが多く開発されている．また，アクチュエータの柔軟性によって構造的な柔軟性を実現できるため，人間の生活空間内で活動するロボットに必要な衝突安全性を容易に実現可能と考えられる．しかし，前述の空気圧駆動ロボットはいずれも圧縮空気の供給を外部の大型コンプレッサに依存しているため，行動範囲が大きく制限される．また，外部からエネルギ供給を受けない自立型を目指して開発された空気圧駆動ロボット buEnwa[6] では，立ち上がる動作や，腕や脚を動かす動作は実現できているものの，外部からの圧縮空気の供給を受けずに跳躍のような動的動作は実現できていない．この原因の 1 つとして，ロボット自身が作り出せる圧縮空気が低圧であり，アクチュエータが発揮できる最大力が低いことが挙げられる．また，自立型空気圧駆動ロボットでは，アクチュエータを駆動するための圧縮空気を貯蔵するためのタンク容量が限定されるため，圧縮空気の効率的な利用も必要である．本稿では，ロボットへの高圧圧縮空気の供給を実現する超小型・高圧コンプレッサと，圧縮空気の利用効率とコンプレッサの最大圧縮圧を向上する空気圧回生システムを実装した自立型空気圧駆動ロボット BIRDLEG を設計・製作し，跳躍動作の実現によって自立型空気圧駆動ロボットに必要な設計コンセプトを示す．

2.　高圧圧縮空気による空気圧アクチュエータの最大力向上を実現する超小型・高圧コンプレッサ

2·1　改良型超小型・高圧コンプレッサの設計・製作

すでに開発されている空気圧駆動ロボット buEnwa[6] では，超小型コンプレッサと，骨格内エアタンクを実装することによって自立型を目指している．しかし，立ち上がる動作や，無負荷で脚や腕を動かす動作は実現できているが，設計時に目標としていた跳躍などの動的動作は外部からの圧縮空気の供給無しでは実現できていない．この問題の原因の一つは，buEnwa が搭載しているコンプレッサが作り出す圧縮空気の最大圧力が 400[kPa](gauge) と低く，結果として空気圧アクチュエータが発揮できる最大力が低下し，関節トルクが低下することにある．従って，ロボットに搭載可能かつ高圧圧縮を実現するコンプレッサが必要である．

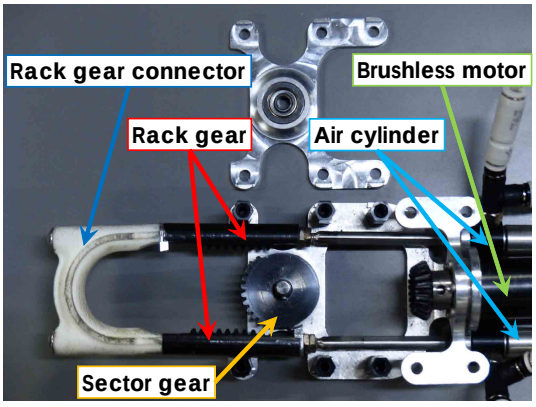

Fig.1 Details of components of the new super-small high-pressure compressor

小型・軽量のコンプレッサはすでに [7][8][9][10] 多く開発されており，これらはロボットに十分実装可能な寸法・質量である．また，前述の buEnwa に搭載されている SQUSE 製 MP-2-C のように既製品として発売されているものも存在する．しかし，これらのコンプレッサが実際に発揮する最大圧縮圧は高くても 400[kPa] 程度であり，高い圧力を発揮する性能を有していない．

そこで，ロボットに搭載可能かつ高圧圧縮を実現する超小型・高圧コンプレッサを開発した [11]．このコンプレッサは最大 958[kPa] を実現したが，吐出量の少なさや，動作時の振動と騒音，また，動作によってギアが容易に破損することや，更なる軽量化が課題となっていた．このうち，耐久性の向上と，軽量化を目的として開発した改良型超小型・高圧コンプレッサを図 2 に，内部構造を図 1 に示す．基本的な構造や，動作方式は前述の超小型・高圧コンプレッサと同様であり，2 本のエアシリンダをラック・アンド・ピニオンによって駆動する 2 シリンダ型直動コンプレッサである．フレームを軽量化すると共に，耐久性向上を目的として，平歯車の材質を POM(ポリアセタール) から S45C に変更した．また，ギア同士の不適切な噛み合いを軽減するため，平歯車とラックギアに切り欠きを設けている．この改良型超小型・高圧コンプレッサの質量は 525[g] であり，約 50[g] の軽量化を実現した．

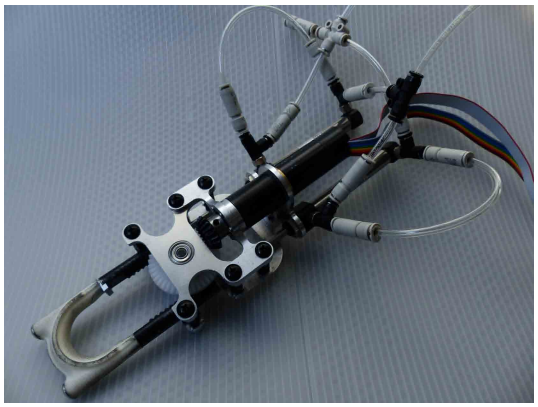

Fig.2 The super-small high-pressure compressor

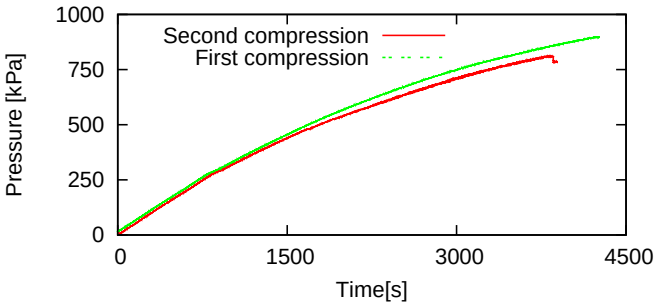

Fig.3 Compression performance of the super-small high-pressure compressor

2·2 超小型・高圧コンプレッサの性能検証

製作した改良型超小型・高圧コンプレッサの性能を検証するために，2.8[L] の容量を持つエアタンクへ加圧する実験を 2 回行った．このエアタンクは，4. 節で述べるロボットに実装するエアタンクである．このコンプレッサの圧縮によるエアタンクの圧力変化を図 3 に示す．この結果から，最大で 800 または 900[kPa] に到達していることがわかる．従って，すでに開発した超小型・高圧コンプレッサに近い性能を維持しつつ軽量化に成功したと言える．また，耐久性についても向上したことを確認した．

3. コンプレッサの最大圧縮圧向上を実現する空気圧回生システム

通常の空気圧駆動ロボットにおいて，アクチュエータ内の圧縮空気を排気する場合は大気解放されている．しかし，圧縮空気を大気解放することは，アクチュエータの駆動に用いた圧縮空気のエネルギを全て捨てることを意味し，圧縮空気の搭載量が限られている自立型空気圧駆動ロボットではより効率的に圧縮空気を利用する必要がある．また，あらかじめ大気圧以上に与圧された空気をコンプレッサの吸気として用いることによって，圧縮空気の消費量低減だけではなく，コンプレッサの最大圧縮圧，吐出量を底上げすることができる．この空気圧回生システム [11] を付与した空気圧回路を図 4 に示す．この空気圧回路では，アクチュエータの動作に必要なメインタンクと給気弁，排気弁とは別に回生用サブタンクと回生弁を追加している．通常は排気弁によって大気解放されるアクチュエータ内の圧縮空気の一部を回生弁から回生用サブタンクに送り込み，一時的に圧縮空気を貯蔵する．回生用サブタンクに貯蔵された圧縮空気は，コンプレッサが動作する際には吸気として供給され，圧縮空気の回生動作を実現する．このような圧縮空気の回生機能を有した空気圧回路は佐々木らによる例がある [12]．本研究で提案する空気圧回生システムでは，より高い圧力の圧縮空気を扱うことや，またコンプレッサの最大圧縮圧の向上を目的としていることがポイントである．

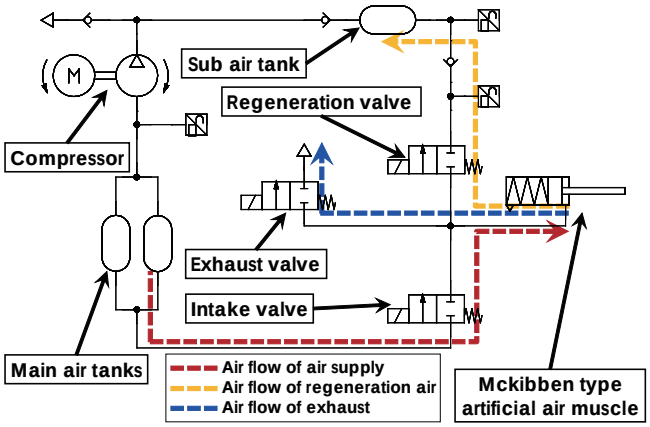

Fig.4 The pneumatic circuit with the regenerative air pressure system (RAPS) and air flows of each states

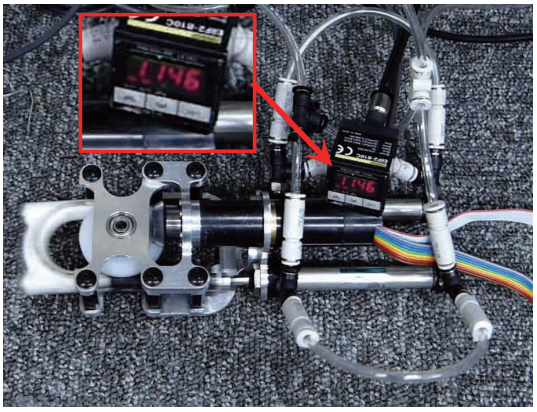

Fig.5 The super-small high-pressure compressor with supercharging realized 1146[kPa] compression.

3·1 コンプレッサの最大圧縮圧向上

前述した空気圧回生システムの回生動作によってサブタンクに貯蔵された圧縮空気をコンプレッサが利用することや，一旦流路を切り替え，コンプレッサが回生用サブタンクへの加圧を行い，回生用サブタンクの圧力がある程度得られた時点で流路を切り替え，回生用サブタンクの圧縮空気をコンプレッサの吸気に送り込み，再度コンプレッサはメインタンクの加圧を実現する空気圧システムを構成することで，より高い最大圧縮圧を実現可能となる．

これらの動作を実現する回生システムの基礎実験として，空気圧回生システムがコンプレッサの最大圧力向上に寄与することを検証するため，図 2 に示す改良型超小型・高圧コンプレッサへ 300[kPa] の圧縮空気を過給し，最大圧縮圧の向上の検証を行った．過給圧の供給は容量 12[L] のエアタンクから行い，圧縮を行うエアタンクの容量は 1.4[L] とした．結果として，図 5 に示すように過給によって，大気圧からの圧縮と比較して最大圧縮圧を大幅に向上を実現し，図 5 に示すように約 1.1[MPa] の圧力を実現した．図 5 の 350[s] 付近で圧縮圧が低下している理由は，エアタンクの安全弁が作動したためであり，線形に近い圧力上昇特性を見れば，2·2 節で得られた結果と同様に圧縮効率にはまだ余裕があり，更なる最大圧縮圧の向上は可能と思われる．

4. 自立型空気圧駆動ロボットの実現

4·1 自立型空気圧駆動ロボット BIRDLEG の概要

設計・製作した自立型空気圧駆動ロボット BIRDLEG を図 8 に示す．ロボットの関節は 4，質量は 9[kg]，全高は伸長時 1[m]，屈曲時 0.6[m] である．骨格構造は鳥類及びカンガルーなどの有袋類を参考とし，筋配置はカンガルーと人間の筋配置を参考にしている．また，このロボットは自立型であるため，図 10 に示すように，骨盤にコンプレッサの駆動に必要なバッテリ，コンプレッサ，エアタンク，電磁弁など，ロボットの動作に必要なすべての

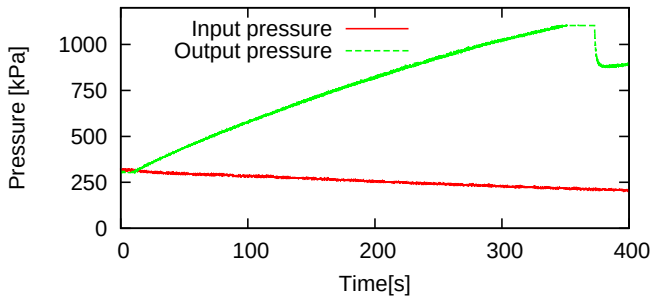

Fig.6 Compression performance of the super-small high-pressure compressor with supercharging

システムを搭載している．

4·2 骨格構造

鳥類やカンガルーなどの有袋類を参考とした．これらの脚の骨格構造は，人間がつま先立ちをしている状態に近い．このような骨格構造は脛骨が非常に長く，従って跳躍動作に必要なアクチュエータの長さを大きく取ることが可能となり，空気圧人工筋の収縮長を長くすることができる．この結果，モーメントアームの選択範囲が広がり，各人工筋にトルク重視や速度重視の役割を振り分けることが可能となる．例えば，跳躍動作の初期に必要な大きなトルクを発揮したり，足が地面から離れる直前にスピードを稼ぐことを目的とした筋配置を設定することが可能となる．従って，このような骨格構造は人間に見られるような骨格構造より跳躍動作に適していると考えられる．

BIRDLEG の骨格は図 7 に示すように，骨盤 (Pelvis)，尾椎骨 (Caudal vertebrae)，大腿骨 (Femur)，脛骨 (Tibia)，付蹠骨 (Tarsometatarsus)，中足骨 (Metatarsus)，足根骨 (Tarsus)，踵骨 (Calcaneus)，趾骨 (Phalanges) の 8 種類の骨によって構成されている．この内，骨盤と尾椎骨，付蹠骨・中足骨・足根骨及び踵骨はそれぞれ一体となっているため，実質は 5 つの骨で構成されている．これ以降，BIRDLEG の骨格に関する記述は，骨盤は尾椎骨を含め，また同様に，付蹠骨は足根骨・中足骨と踝骨を含めるものとする．BIRDLEG の大腿骨，脛骨，付蹠骨の長さはカンガルーの骨格標本の画像から大まかな比率を割り出し，大腿骨：脛骨：付蹠骨を 5:11:5 とした．BIRDLEG の骨格には軽量化や部品製作・組立の簡便化を意図し，趾骨以外のすべての骨の構成に 15[mm] または 20[mm] のアルミ角棒を用いた．各骨はスペーサとアルミ角パイプ，アルミ板のパーツの組み合わせによって組み立てられている．スペーサの一部は空気圧人工筋の取り付け位置になっており，空気圧人工筋の交換が迅速かつ容易に行えるようになっている．また，アルミ板のパーツを変更することによって，筋のモーメントアームを変更することができる．趾骨の主構造は粉体焼結のラピッドプロトタイプングにより製造した．

4·3 筋配置

BIRDLEG の筋配置を図 9 に示す．この筋配置は人間の脚とカンガルーの脚の筋配置を参考として，合計で 9 本の筋肉を設置した．特に跳躍動作に必要と考えられる筋肉である腓腹筋 (Gastrocnemius)，ヒラメ筋 (Soleus)，長趾屈筋 (Flexor digitorum longus) は，踵関節軸から筋の固定位置との距離をそれぞれ 31.5[mm]，46.5[mm]，71.5[mm] として関節のスピードとトルクを両立可能とした．この他の空気圧人工筋のモーメントアームについては，着地時のしゃがんだ姿勢から，跳躍直前の各関節が伸びきった状態における各人工筋の必要ストロークを算出し，ストロークの過不足に応じてモーメントアームを調節し，各人工筋肉の配置を決定した．

4·4 空気圧システムの構成

BIRDLEG は，空気圧回路に図 4 に示した空気圧回生システムを実装している．従って，1 本の空気圧人工筋あたり 3 個の電磁弁が接続されている．また，跳躍動作を実現することが目的であり，圧縮空気の流量を多くする必要がある．そこで，空気圧回路を可能な限り太径のエアチューブを用いて配管を構成するとともに，大流量に対応できる電磁弁 (KOGANEI 製 JE12) を用いた．また，空気圧人工筋を駆動するための圧縮空気を貯蔵するメインタンクは合計 2.8[L]，回生用サブタンクは合計 1.4[L] の容量を持つ．

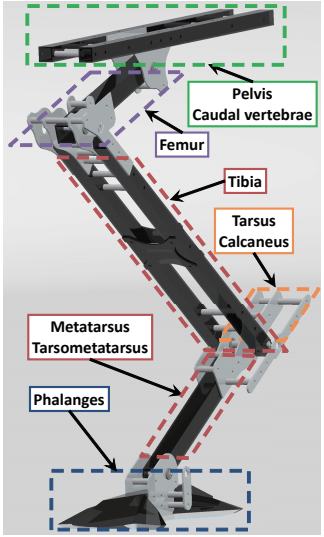

Fig.7 The skeletal system of BIRDLEG

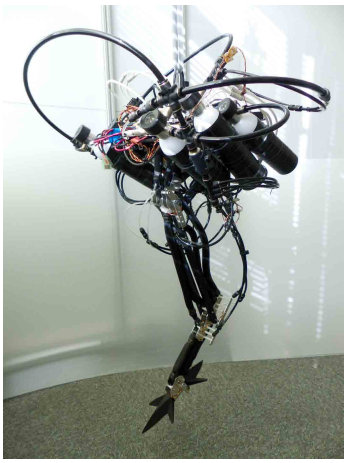

Fig.8 BIRDLEG

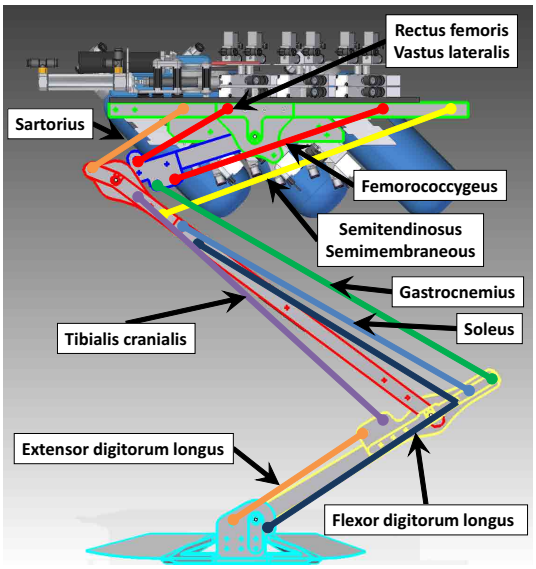

Fig.9 The muscle arrangement of BIRDLEG

5. 内蔵コンプレッサの圧力供給による BIRDLEG 跳躍実験

製作した自立型空気圧駆動ロボット BIRDLEG が実際に搭載されたコンプレッサからの圧縮空気の供給を基に跳躍運動を実現可能かどうかを検証した．また，同時に回生システムを動作することで，どの程度の圧縮空気を回収可能かを検証した．BIRDLEG に搭載した超小型・高圧コンプレッサにより，約 800[kPa] まで加圧されたエアタンクに貯蔵された圧縮空気を用いて，跳躍動作を行った．跳躍動作は，時間ベースによる電磁弁の開閉制御によって実現している．結果として，図 11 に示すように，外部からの圧縮空気の供給を受けずに跳躍を実現した．また，1 回の跳躍における BIRDLEG のメインタンクと回生用サブタンクの圧力変化の結果を図 12 に示す．この結果を見ると，メインタンクは約 790[kPa] から 600[kPa] に減少し，回生用サブタンクは 150[kPa]

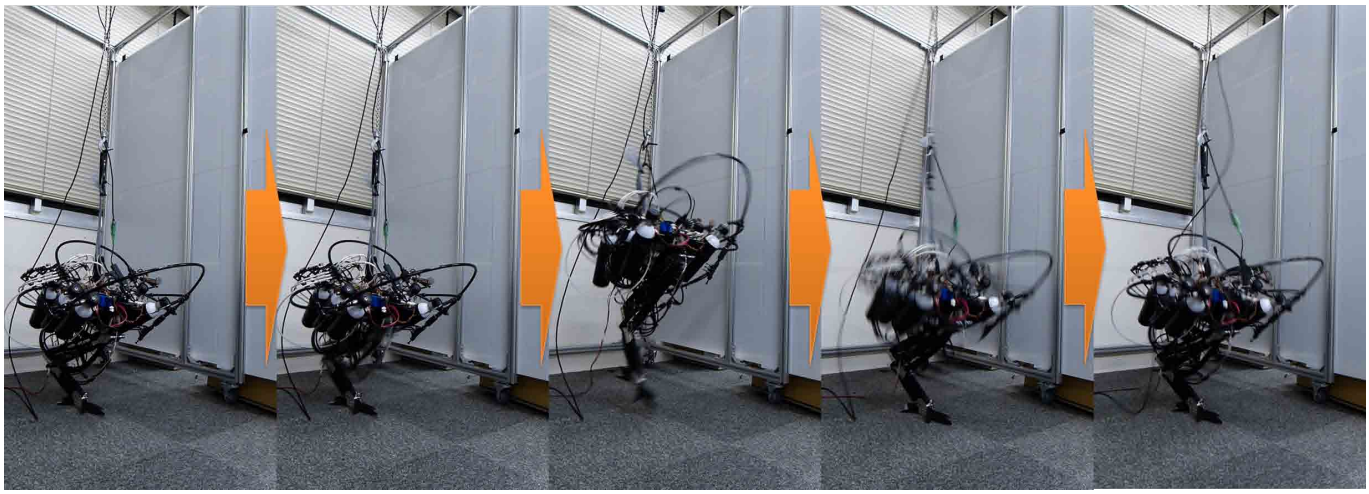

Fig.11 Jumping movement of the self-contained pneumatic robot BIRDLEG

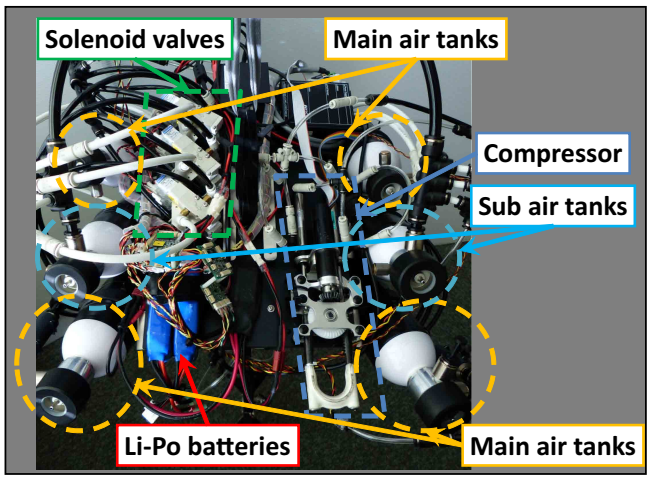

Fig.10 Devices which are mounted on BIRDLEG to drive itself

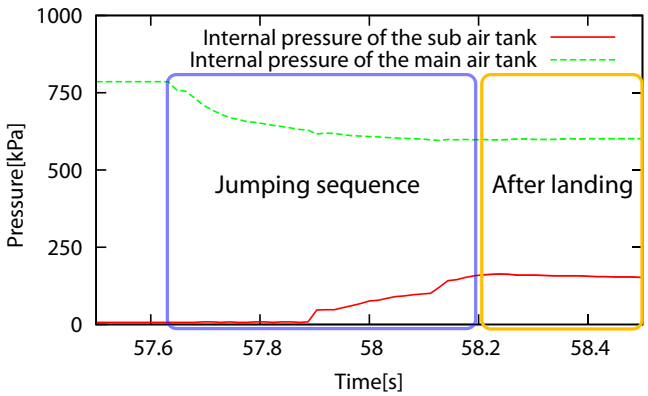

Fig.12 Internal pressure transitions of main air tank and sub air tank of BIRDLEG

へ上昇している．概算で消費した空気の容量は，メインタンクの容量が 2.8[L] であるため，5.3[NL](ノルマルリットル) である．一方で，回収した空気の容量は回生用サブタンクの容量が 1.4[L] であるため，3.5[NL] である．従って，動作に用いた圧縮空気のうち約 65%を回収できていることになる．しかし，2 度目の跳躍においては圧縮空気の回収率は 20%程度に低下していしまう．これは回生用サブタンクの圧力が高くなるため，圧縮空気を回生できなくなるタイミングが早くなり，より多くの圧縮空気を大気解放するためである．従って，回生を有効に行うためには，回生用サブタンクの圧縮空気をすぐに再圧縮するか，回生用サブタンクの容量を大きく取ることが有効である．

6. 結言及び今後の展望

本稿では，高出力な動的動作が可能な自立型空気圧駆動ロボットに必要な設計コンセプトを示し，それを実現するための改良型超小型・高圧コンプレッサと，自立型空気圧駆動ロボットの実機 BIRDLEG を設計・製作した．また，BIRDLEG が跳躍動作を実現することで，本研究で示した設計コンセプトが自立型空気圧駆動ロボットに適切であることを示した．

今後の展望として，より実用的な空気圧回生システムの開発・実装や，超小型・高圧コンプレッサの性能向上を行い，さらに高圧かつ安定した圧力供給を実現するコンプレッサを実現することが挙げられる．また，より長時間活動できる自立型空気圧駆動ロボットの実現を目指す．

文献

[1] R. Niiyama, et al. Mowgli: A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007)*, 2007.

[2] R. Niiyama, et al. Athlete robot with applied human muscle activation patterns for bipedal running. In *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids 2010)*, pp. 498–503, Nashville, Tennessee USA, Dec. 2010.

[3] K. Narioka, et al. Development of a minimalistic pneumatic quadruped robot for fast locomotion. In *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 307–311, 2012.

[4] K. Hosoda, et al. Synergistic 3D limit cycle walking of an anthropomorphic biped robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 470–475, 2007.

[5] B. Verrelst, et al. The pneumatic biped " Lucy " actuated with pleated pneumatic artificial muscles. *Autonomous Robots*, Vol. 18, No. 2, pp. 201–213, 2005.

[6] I. Mizuuchi, et al. Design and development of a compressor-embedded pneumatic-driven musculoskeletal humanoid. In *Humanoid Robots (Humanoids), 2012 12th IEEE-RAS International Conference on*, pp. 811–816, 2012.

[7] 則次，他. 電磁石型リニア駆動小型コンプレッサの開発. 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第 33 巻, 第 4 号, pp. 83–90, 2002.

[8] W. Wang, et al. Characteristic of a miniature linear compressor. *International Compressor Engineering Conference*, No. 1985, p. 1288, 2010.

[9] 韓，他. ロータリアクチュエータを用いた小型コンプレッサの開発. 日本油空圧学会論文集, 第 32 巻, 第 5 号, pp. 111–117, 2001.

[10] Y. Maeda, et al. Development of small-sized air pump using balloon vibrator for wearable devices. In *Symposium on Fluid Power*, Vol. 2008, 2008.

[11] 熊倉，他. 高効率自立型空気圧駆動ロボットのための超小型高圧コンプレッサ及び空気圧回生システムの実現. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 '13 予稿集, pp. 2P1–D13, 2013.

[12] 佐々木，他. 空気圧駆動ウェアラブルデバイスのための小型空気圧供給システムの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 7, pp. 659–668, 2013.