

# 可動域・柔軟性を向上するパネスライダ機構を備えた義手用人工筋駆動型アームの 試作と評価

## A Novel Pneumatic Artificial Muscle-Driven Arm with a Spring and Slider Device Improves Prosthesis Range of Motion and Compliance

○ 関根雅 (千葉大) 北佳保里 (千葉大) 兪文偉 (千葉大)

Masashi SEKINE, Chiba University  
Kahori KITA, Chiba University  
Wenwei YU, Chiba University

**Abstract:** An arm using a parallel mechanism driven by a McKibben pneumatic artificial muscle (PAM) was developed as a transhumeral amputation and shoulder disarticulation prosthesis. PAMs are lightweight and comfortable, and can therefore enhance patient compliance. By equipping a spring and slider device with PAM we can reduce injurious forces, improve prosthesis safety and respond to external disturbances such as a collision or fall. A spring and slider device may also improve arm range of motion (ROM). We evaluated the efficacy of PAM arm with a spring and slider device using geometric consideration, vibration system model analysis with a mass, spring and damper measurements based on behavior data in an impact experiment and ROM measurements during motion experiments. Our findings suggest that a spring and slider device can increase arm ROM, absorb impact forces and enhance user safety.

**Key Words:** Prosthesis, Pneumatic Artificial Muscle, Spring and Slider Device, Lightweight, Vibration System Model Analysis

### 1. はじめに

義手は切断患者の機能を大きく補うことができ、重要な役割を担うものである。特に肩などの高位切断の場合、残肢が少ないために、残肢による義手の操作や制御は難しい。さらには健常腕に本来備わっているインピーダンスすなわち安全性に大きく寄与する柔軟・粘弾性も失われてしまうために、義手にその要素を組み込むことが重要である。それゆえ高位切断向けの義手の開発は難しく、可動範囲、出力や安全性の向上が必要となる。関連する研究については、直接義手に関するものではないが、空間的な特性の改善につながるデバイスの開発の報告がある。例えばロボットの関節可動域向上について研究例<sup>(1)</sup>やロボットのアクチュエータのストローク改善のためのデバイスの提案<sup>(2)</sup>等がなされている。安全性、特に外部環境との接触・衝突や転倒時における装着者へのダメージ軽減に関する衝突対応性には高い柔軟性が有効であるが、これをセンサー情報に基づいたインピーダンス制御によりコンプライアンスを持たせることで実現し、環境との相互作用制御のアプローチが研究されている。しかし、この柔軟性を制御手法で賄うのみならず、予め機械的受動要素を組み込み機械構造自体が柔らかさを持つことも必要である<sup>(3)</sup>。この場合、予測できない物体と衝突しても時間遅れが生じることなく衝突力を緩和でき、パネ等の柔軟性を取り入れた幾つかの研究が報告されている<sup>(4)</sup>。一方で空気圧ゴム人工筋肉 (Pneumatic Artificial Muscle, PAM)の活用も考えられる。これには空気およびゴムの粘弾性により柔軟性が備わり、軽量でもある<sup>(5)</sup>。義手の必要な特性を考えれば、軽量、高出力、粘弾性を兼ね備えた PAM の使用は適していると考えられる。

我々は今まで義手の研究開発において、基本となる小型 PAM 駆動多節軽量パラレルリンク型アームを提案した<sup>(6)</sup>。このアームに対し各部寸法をパラメータとして操作性やアクセス性といった空間的特性を評価し、義手構造の最適化を行っている。しかしながら、日常生活動作を実際に行わ

せるには空間特性、特に可動範囲を満足できておらず、また手先の負荷を考慮した動作も確認できていない。さらには固有粘弾性による安全性と外乱に対する応答特性、具体的には外部との衝突対応性も未調査である。本研究では、まずベンチマークとなる PAM を使用した基本的な構造を持つアームのモデルを作成し実機を試作する。そしてこれに対して可動範囲改善のためのデバイスを提案し、ベンチマークアームに実装する。このデバイス有無により 2 つの仕様を実験により比較し、可動範囲と衝突対応性すなわち柔軟・安全性を評価する。

### 2. アームの構造

図 1 にベンチマークアームのためのモデルを示す。アームは 3 つのセグメントから成り、3 つの PAM( $a(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}, a_{22}, a_{23})$ )で構成されるパラレルメカニズムを 2 つ(セグメント 1, 2)連結している。セグメント 1 はベース 1 とムービングプラットフォーム(以下 MP)1 と名付けた 2 個のパーツを、支柱となるバックボーン(以下 BB)と BB を中心に均等に配置された PAM でリンクして構成している。BB1 はベース 1 の中心  $O_{B1}$  に配置され、ボールジョイント J1 で MP1 に繋がっている。これは PAM が駆動することで、MP1 が J1 回りに回転することを可能にする。セグメント 2 はセグメント 1 と同じ構造であり、長さが異なるのみである。セグメント 1 の MP1 とセグメント 2 のベース 2 が接続されている。セグメント 3 はハンド部である。セグメントの寸法は図の通りである。各ベースでの PAM の取り付け位置  $B_{i, 2i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) は、ベース中心から半径 50 mm に位置する。また MP における取付位置  $M_{i, 2i}$  ( $i=1, 2, 3$ )は 45 mm に位置する。アクティベート直後の PAM を  $a'$ とする。

PAM がベース及び MP において半径 50, 45 mm で固定されている、すなわちベンチマークの場合、図 1(b)に示すように PAM が動作して長さが変化し、2 つの受動ボールジョイント J1, J2 が回転する。それに応じてハンドの位置であ

る BB3 の先端の座標  $(x, y, z)$  が変化する. 本紙面ではアームにハンドは設置しないが, 別途簡易的な把持機能があるものを試作し, 後述の実験のためにその重量と可能な把持物の重量を参考とする.

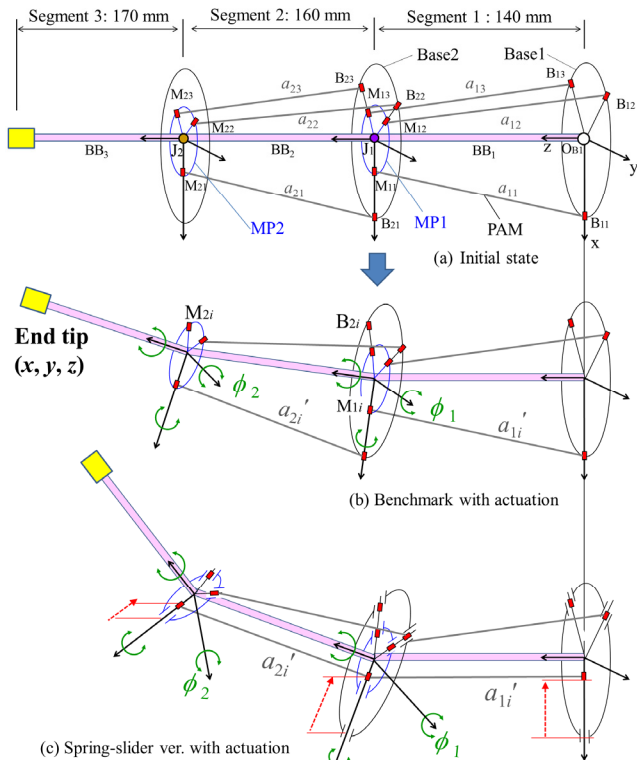


Fig. 1 Arm model

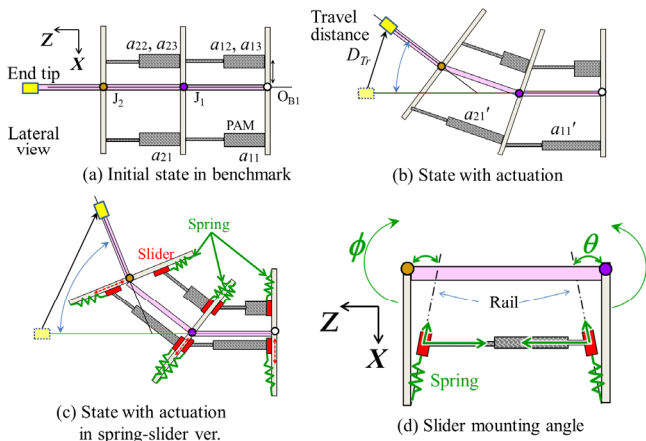


Fig. 2 Spring and slider mechanism

3. バネスライダ機構

セグメントのベースと MP の各 PAM の取り付け部である  $B_{1i}, B_{2i}, M_{1i}, M_{2i}$  に小型スライダを設置し, その詳細を図 1(c) と図 2 に示す. ある PAM (図 2(a) の  $a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}$ ) が収縮する場合, BB を中心軸として, その PAM と拮抗関係にあたる PAM (図 2(a) の  $a_{11}, a_{21}$ ) が引張られる. そして図 2(b) のように  $a_{11}, a_{21}$  の最大長が拘束条件となり, それ以上関節は回転しない. しかし図 2(c), (d) のように, この PAM の根本のスライダが  $B_{1i}, B_{2i}, M_{1i}, M_{2i}$  に締結したレール上を, BB の方向へ受動的に最大 31mm スライドする. そのため PAM も同様にスライドする. これは図 1(b), (c), 図 2(c), (d) に示すようにセグメントのジョイントの回転角を拡大することを可能

とする. この動きは図 2(d) のように, スライダ・レールがベース及び MP に対して角度  $\theta$  を付けて設置しているために可能となる. これにより結果的に可動範囲を拡大することができる. 圧縮した PAM が元に戻る場合, スライダは設置されたバネにより戻される.

さらにアームが外部環境と接触・衝突した場合, アームはその衝突の位置から離れ逃げる方向への移動・回転を強いられると予想できるが, その際にバネスライダが受動的に移動することで衝撃を和らげると考えられる. これを後述の実験により確認する.

4. 実験方法

上述のモデル構造を基に実機を試作し, 動作実験を行い, アームの可動範囲, 負荷の影響, 衝撃吸収特性すなわちアームの粘弾性を調べる. これをベンチマークアームとバネスライダ機構付アーム (以下バネスライダアーム) の 2 通りについて行い, デバイスの有効性を検証する.

4-1. 可動範囲

可動範囲とペイロードを動作実験により確認する. 可動範囲については, 最初に無負荷の状態では PAM をアクティベートしアームを上 (アクティベートされる PAM:  $a_{12}, a_{13}, a_{22}, a_{23}$ ) ・右下 ( $a_{11}, a_{13}, a_{21}, a_{23}$ ) ・下方向 ( $a_{11}, a_{21}$ ) に動作させ計測した (図 1 参照). 具体的には図 2(a), (b), (c) のように初期状態から PAM をアクティベートさせたときのアーム先端の移動距離  $D_{tr}$  を計測した. 次に上・下方向については負荷 (後述) を与えたときの移動距離を測定した.

4-2. 粘弾性

アームのバネ定数  $k$  と粘性減衰係数  $c$  を計測し粘弾性を調べる. アームを図 3 のように質点系モデルと片持ち梁の簡易モデルと考える. まずバネ定数を調べるためにアーム先端に 50 g から 50 g ずつ 500 g まで静荷重  $F$  (質量  $m$ ) を与え, 先端の変位から式 [1] より  $k$  を計算する.  $c$  の計算には図 3(c) に示すように 100 g の重り  $m$  を高さ 40 cm の位置から自由落下によりアーム先端に衝突させる. 重りには粘着剤がついており, アームに衝突した後はアームと重りは接着したまま同じ挙動をとる. 先端の軌跡は図 4 のような減衰振動波形となるのが予想され, 振動波形は式 [2] で表されると仮定する. ここで  $C_1$  を任意定数,  $z$  を変位,  $t$  を時間,  $w_d$  及び  $w_n$  を減衰/非減衰固有角振動数,  $\zeta$  を減衰比とする.

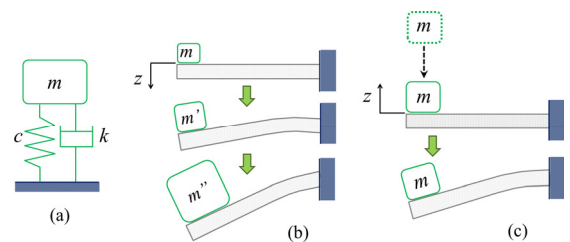


Fig. 3 Measurement  $k$  and  $c$  ((a): Mass system model, (b) and (c): Cantilever model with static load (b) and free-falling weight (c))

また図 4 中の振幅を  $z_1, \dots, z_i$  とすれば, 1 周期後の振幅比  $z_1/z_2$  は [3] 式のようなになる. 一般に  $i$  周期後の振幅比を  $z_1/z_i$  とすれば, 対数減衰率  $\delta$ , 減衰比  $\zeta$ , 粘性減衰係数  $c$  の関係は以下の式 [4] で表される<sup>(7)</sup>.

$$F = kz \quad [1]$$

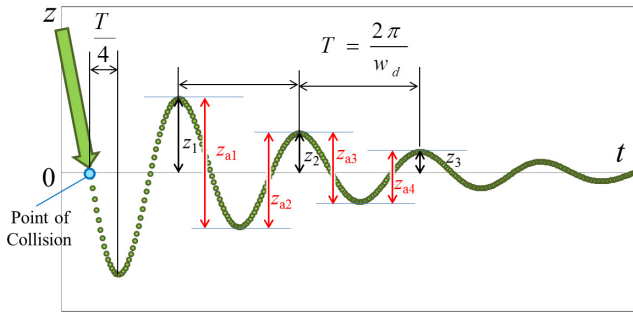


Fig. 4 Damped oscillatory waveform

$$z = C_1 e^{-\zeta w_n t} \cos(w_d t) \quad [2]$$

$$z_1 / z_2 = z_2 / z_3 = \dots = e^{\zeta w_n T} \quad [3]$$

$$\delta = (1/i) \ln(z_1 / z_i), \quad \zeta = \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + 4\pi^2}}, \quad c = 2\zeta \sqrt{mk} \quad [4]$$

$$\delta = (2/i) \ln(z_{a1} / z_{ai}) \quad [5]$$

実際には測定したグラフの振動の平衡位置が読み取り難いため、図4の $z_{ai}$ を読み取り、式[4]の $\delta$ に2を掛けたものを $\delta$ とする(式[5])。

さらに下記の式[6]より $w_n, w_d, T$ を求める。図4中の $z_1$ の時間 $t$ が0であるとすれば、これらを用いて式[2]の定数 $C_1$ を逆算により算出し、式[2]を決定できる。これにより得られる、近似された理想的な振動波形を用いて、ベンチマークアーム、バネスライダアームの2通りについて比較を行う。

$$w_n = \sqrt{k/m}, \quad w_d = w_n \sqrt{1-\zeta^2}, \quad T = 2\pi / w_d \quad [6]$$

4-3. 衝撃力の緩衝特性

アーム先端におもり $m$ が衝突する直前の速度を $v$ 、衝突後の速度を $v'$ とし、衝突後アームが最下点まで湾曲し停止( $v' = 0$ )するまでの時間を $dt$ とする。運動量変化より衝撃力 $F_{Imp}$ は次式[7]で表される<sup>(8)</sup>。2通りのアームに対して $F_{Imp}$ を計算し衝撃力を比較し緩衝特性を確認する。ここで $dt$ は式[6]と図4から $T/4$ と仮定する。自由落下についての式を利用し、 $v$ は2.8 m/sとした。

$$F_{Imp} = m(v-v')/dt = mv/dt \quad [7]$$

5. 結果

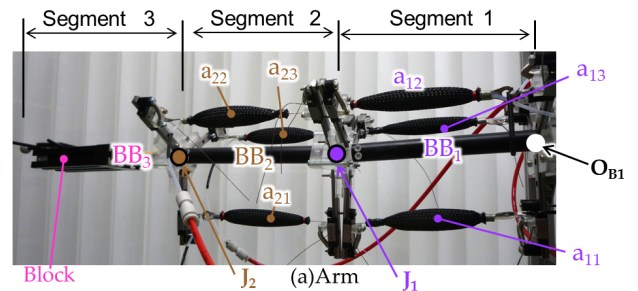
5-1. 試作機

図5(a)に試作機を示す。PAMの設置部にバネスライダ機構を組み込み、ネジによりバネスライダをロック可能にした。ロック状態でベンチマークアームとして、動作可能状態でバネスライダアームとして実験を行う。今回は実験のしやすさを考慮し、セグメント3のハンド部にはハンドは装着をせず図のようにブロックを取り付けた。また並行してポリアセタール製の把持が可能な1自由度ハンドを試作した(図5(b))。このハンドは重量が約100gであり(図5(b)における左下部の実験用金属ベースは除く)、300gのペットボトルを把持できた。これを参考に上記ブロックは100gになるようにサイズを設定した。以降の実験は、このブロックにモーションキャプチャのマーカーを張り付けて行った。アームの総重量は704gであった。またスライダの取付角度は

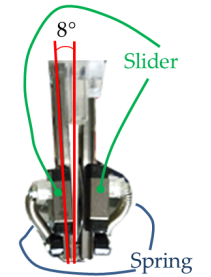
実験的に $8^\circ$ とした(図2(d), 5(c)参照)。

5-2. 可動範囲の比較

まずアームを無負荷の状態の上・下・右下に移動させた場合の比較結果を図6左部に示す。バネスライダアームは全ての方向において移動距離 $D_{Tr}$ が改善され、スライダ機構の効果が表れている。特に上・右下方向の効果が大きくそれぞれ77.1%, 102.6%の増加であった。これはこれらの方向に投影したスライダの移動可能量が下方より大きいためである(下方向は70%の増加)。次に前述のペットボトルの重さを参考に300gの負荷をかけた状態での可動範囲を確認した。この際、上・下の方向に動作させ比較した。図6右部に示す。この状況でもベンチマークに比べて、バネスライダアームは可動範囲を上方向に34.1%, 下方向に55.7%向上させている。



(b) Hand



(c) Spring-slider device

Fig. 5 Prototype

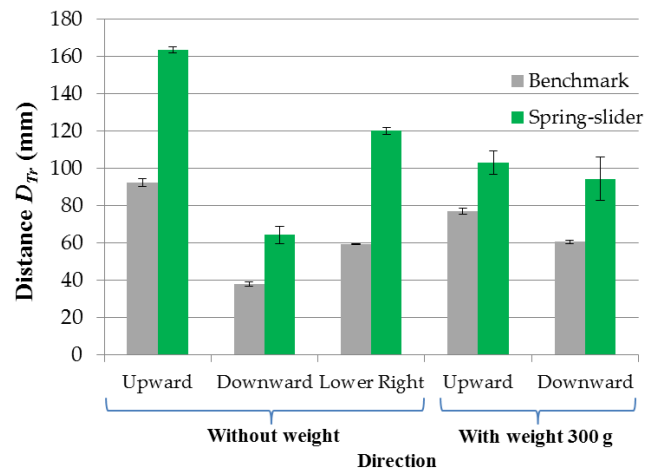


Fig. 6 Range of motion ( $D_{Tr}$ )

5-3. 粘弾性の測定

2通りのアームに対して静荷重 $F$ (質量 $m$ )を加えた際のアーム先端変位を測定し、式[1]及び最小二乗法によりバネ定数 $k$ を求めた。さらに衝突実験によって得られた波形の生データ、そして第4-2節で示した方法により減衰比 $\zeta$ 、粘性減衰係数 $c$ を算出した。図7に示す。さらに式[2]より得た

近似振動波形を図 8 に示す。

5-4. 衝撃力の緩衝特性

式[6], [7]及び得られた各係数を用いて，周期  $T$  と衝撃力  $F_{Imp}$  を算出した。図 9 に示す。

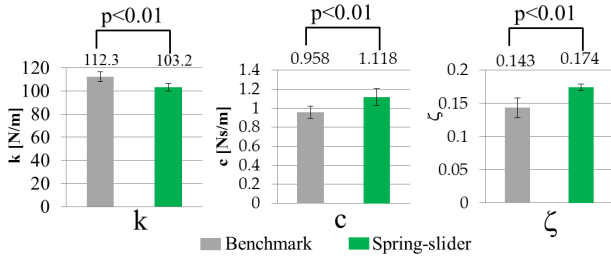


Fig. 7  $k$ ,  $c$  and  $\zeta$

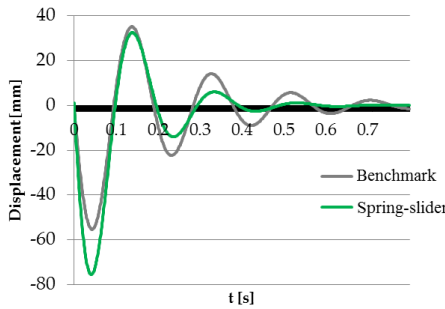


Fig. 8 Approximated ideal oscillatory waveforms

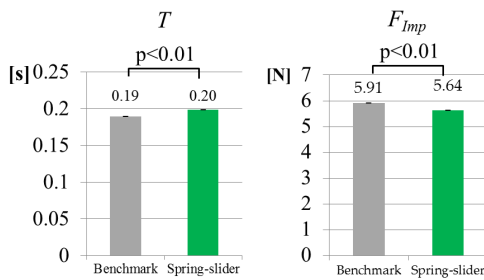


Fig. 9  $T$  and  $F_{Imp}$

6. 考察

まずスライダ機構の可動範囲への効果であるが，図 6 より移動距離  $D_{Tr}$  は全方向においてベンチマークアームと比較して向上している。さらに負荷を与えた場合でも優位性が確認できた。一般的に可動範囲と出力（ペイロード）はトレードオフ関係にあるが，スライダ機構により双方のバランスを崩さずに向上の効果を得られたといえる。しかしながら図 6 に示すように，上方向動作は負荷がかかることで  $D_{Tr}$  は大きく減少している。そのため，それ以上に負荷を与え続ければ，スライダ機構のバネが耐えられず  $D_{Tr}$  は悪化すると考えられる。バネスライダ機構により可動範囲の改善が見られるものの，実際に日常生活動作において使用される状況を考慮し，スライダのパラメータやバネ定数を再設定して構造を設計する必要があると考える。特にスライダの引張バネ(図 5(c)参照)は負荷に対して大きな影響力を持つため，バネ変更によるスライダの剛性の調整が，負荷に対して改善をもたらす可能性があると考えられる。

次に粘弾性についてである。バネ定数  $k$  について，バネスライダアームはベンチマークアームと比較して小さいものの 8.1%の低下であり大差はなかった。粘性減衰係数  $c$ ，減衰比  $\zeta$  はベンチマークアームに対しそれぞれ 16.7%，21.7%増加した。これらからバネスライダ機構は減衰装置

としても機能し動的な負荷には柔らかく対応でき，さらに静的な負荷に対しては剛性を保つと考えられる。

図 8 の近似振動波形では，図 9 でも示すように両者の周期に差はあまり見られないが，大きな減衰比  $\zeta$  (図 7 参照)のために，バネスライダアームがより早く振動収束している。図 9 においては，バネスライダにより衝撃力が緩和されているのが確認できる。

7. 結言

本研究では義手のためのベンチマークとなる PAM 駆動型のアームを試作した。さらにアーム先端の負荷，すなわち日常生活におけるハンド部への負荷を考慮した可動範囲，衝突安全性を改善するバネスライダ機構を考案・試作し，ベンチマークアームに装着した。そしてアームに負荷を与えた状態での可動範囲測定実験を行った。また安全性を調査すべく衝突実験によりアームの粘弾性を確認した。実験結果からベンチマークアームに対しバネスライダアームは，ペイロードを保ちつつ可動範囲と粘弾性，すなわち衝突安全性を向上させることを示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16K01537 の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) 管納史也, 池本周平, 細田耕, 回転型部分開放関節を搭載した上肢帯ロボットの開発, 第29回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2P1-7, 2011.
- (2) 伊原道典, 堂田周治郎, 赤木徹也, 長変位型ゴム人工筋の改良とパワーアシスト装置への応用, 日本機械学会第22回バイオエンジニアリング講演論文集, p. 110, 2010.
- (3) 山下忠, 武内顕一, 奥野康, 相良慎一, 拮抗駆動関節による剛性とトルクの制御:空気圧アクチュエータによる実験的検討, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 5, pp. 666-673, 1995.
- (4) 森田寿郎, 菅野重樹, メカニカルソフトネスとコンプライアンス調節, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6, pp.790-794,1999.
- (5) P. K. Prasad, S. Sen, S. N. Shome and C. Har, Impedance estimation of a pneumatic muscle as a mechanical transmission and actuation device, Proceedings of 2016 IEEE First International Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), pp. 371-375, 2016.
- (6) M. Sekine, K. Sugimori, J. Gonzalez, and W. Yu, Optimization-Based Design of a Small Pneumatic-Actuator-Driven Parallel Mechanism for a Shoulder Prosthetic Arm with Statics and Spatial Accessibility Evaluation, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 10, p. 286, 2013.
- (7) L. K. Koay, M. M. Ratnam and H. Gitano-Briggs, An Approach for Nonlinear Damping Characterization for Linear Optical Scanner, Experimental Techniques, pp.1-9, 2012.
- (8) 生田幸士, 野方誠, 福祉ロボットの安全性に関する統一的评价法の提案—危険性の定量化による安全設計対策の評価—, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 363-370, 1999.