

# モンハナシャコの打撃動作を規範とした高速打撃機構

## Fast striking mechanism based on the striking motion of a Mantis shrimp

伊藤文臣

Fumio Ito

### 1. 緒言

人間や生物は、しなやかな筋や身体の弾性要素を基礎とした高速動作とそれに伴う発生力を利用して走行、跳躍、打撃などを実現する。その一方で、従来から利用される人間の生活と隔離された環境で利用されるロボットは、高速動作とそれに伴う発生力のためにモータなどの低コンプライアンス特性を有するアクチュエータを利用してきた。

近年では、人間や極限環境に対する安全性と適応性に着目して、ソフトロボットに注目が集まっている。これらのソフトロボットは、高コンプライアンス特性を有しており、人間の動作と調和した駆動や柔軟な変形により極限環境へ適応を可能とする。例として、空気圧を動力源としたソフトロボットは、高コンプライアンス特性と出力重量比を有し、人間との共同空間での動作を想定したマニピュレータや人体動作アシスト装具などの拮抗駆動系としての応用が期待されている。しかしながら、ソフトロボットは構成材料の柔らかさと構造の高コンプライアンス特性に起因して、高速動作の実現が難しい。このような柔らかい材料は機械的エネルギーの貯蔵と放出が難しく、高速動作を行うロボットへの応用が制限されるという課題がある。

高速動作とそれに伴う力の発生を目指した研究には、(a)アクチュエータはなく、弾性要素のエネルギーを解放するロボット。(b)モータによりフレキシブルアームをひずませることで、エネルギーの蓄積と放出をして、高速動作するロボット<sup>(1)</sup>。(c)モータにより弾性要素に弾性エネルギーの蓄積と放出をさせるロボット<sup>(2)</sup>。(d)拮抗関節に取り付けるアームを弾性要素にすることで地面からの反力を蓄積し高速動作を生み出すロボット<sup>(3)</sup>。(e)アクチュエータ内部に圧縮空気を蓄積し、その膨張力を一気に放出することで高速動作をするロボット。(f)弾性体に蓄えたエネルギーを一定以上蓄積することで座屈を誘発して、高速動作を実現するロボット。などがある。これらのロボットは高剛性なアクチュエータの利用や弾性体の組み込みにより高速動作する。しかし、これらのロボットは、ソフトロボットにみられる高いコンプライアンス特性と生体筋や空気圧アクチュエータにみられる高い出力密度を有した拮抗駆動による関節の拮抗駆動と高速動作による力の発生との両立が難しい。

本研究では、外骨格型の生物にみられる弾性要素を利用した高速動作とそれに伴う力の発生に着目した。外骨格型の生物は、自身の外骨格の弾性を利用して、柔軟な筋収縮

により、水中、陸上など様々な環境で高速動作する。例えば、モンハナシャコの打撃動作、バッタの跳躍動作などは、筋収縮による外骨格のひずみエネルギーを蓄積し、瞬時に放出して高速動作をする。特にモンハナシャコは水の抗力を受ける環境でも、Fig. 1 に示すように高加速度を発揮し、筋の収縮速度をはるかに上回る 20 m/s で貝を打撃する<sup>(4)</sup>。

本研究では、モンハナシャコの打撃動作を規範として、筋肉の拮抗関節に弾性要素を取り込み、筋肉要素による高コンプライアンス特性を有した拮抗駆動だけでなく、筋肉と弾性要素により合力により、高速打撃する機構を創出する。これより、空圧ソフトアクチュエータが有する高いコンプライアンス特性、高い出力密度を生かし、関節の拮抗駆動と高速打撃に伴う力を発生できる機構を実現する。

以降、第2章では、モンハナシャコの打撃機構のモデル化について記述し、3章では、モンハナシャコにみられる2種類の弾性要素に着目した打撃機構の構築について記述した。4章では、2種類の弾性要素をもとにした機構の苦心に要する時間と打撃強度に関する設計論を記述した。5章では、モンハナシャコの楕円回転する打撃機構に関して、水中における高速動作の実現とその発生力の強化について記述した。6章では、打撃力を強化するキャビテーションの発生するシャコ規範型打撃機構について記述した。

### 2. モンハナシャコの打撃動作を規範とした打撃機構

#### 2.1 モンハナシャコの捕脚構造

Fig. 2 に示すモンハナシャコの捕脚は、長節、腕節、前節、指節と呼ばれる外骨格から構成され、長節上部の鞍と下部の腹側棒は変形して弾性エネルギーを蓄える外骨格の弾性要素として機能を果たす。屈曲筋と伸展筋は起始を長節、停止を腕節に持ち、屈曲・伸展動作にそれぞれ関与する。また捕脚にはラッチと呼ばれる機構が備わっており、屈曲筋の収縮に伴い指節の打ち出しが拘束される。したがって、このラッチは蓄積された弾性力保持に利用される。

#### 2.2 モンハナシャコの打撃動作順序

シャコの打撃動作は、予備動作と打ち出し動作の2つの段階に分けられる。

・予備動作：(a)屈曲筋を収縮させることで関節を屈曲させる。このとき、ラッチにより指節の打ち出し動作が拘束される。(b)この状態で伸展筋を収縮させることで、鞍と腹側棒が変形し、弾性エネルギーが蓄積する。

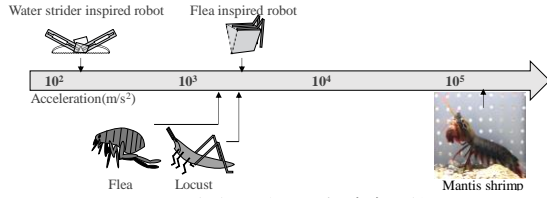


Fig. 1 モンハナシャコの打撃動作との加速度比較.

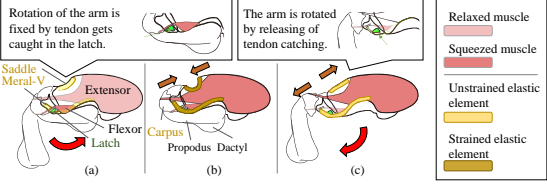


Fig. 2 モンハナシャコの捕脚機構.

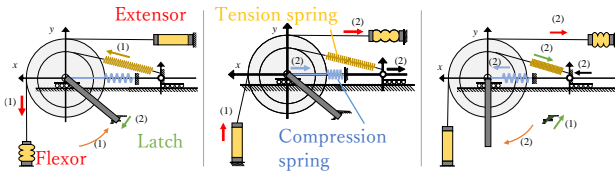


Fig. 3 シャコの打撃動作を規範とした並進方向と回転方向に弾性要素が作用する打撃機構.

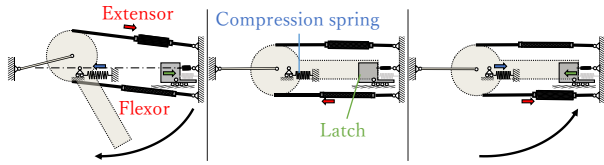


Fig. 4 シャコの打撃動作を規範としたアーム先端が楕円軌道を描く打撃機構.

・打ち出し動作: (c) 屈曲筋を弛緩させると、ラッチによる指節の打ち出しに対する拘束が解除される。これにより、鞍と腹側棒に蓄えられた弾性エネルギーが放出され、伸筋筋の収縮力と外骨格の弾性力の合力により関節が伸展し、指節が押し出される。この時、指節先端の軌跡が楕円のような軌跡を描く。その後、打撃箇所のみでキャビテーションが発生し、それに伴う衝撃力により打撃効果が強化される。

モンハナシャコの打撃機構を考慮して、次の 1.~3. に示す 3 点のモンハナシャコの打撃動作の特徴を取り入れた打撃機構をモデル化した。1. 筋肉による収縮力と 2 種類の鞍と腹側棒に蓄えられた弾性力による合力を利用した打撃をすること。2. 打ち出し動作において、指節先端の回転中心が移動して、楕円のような軌跡を描くこと。3. 打撃箇所のみでキャビテーションを発生し、打撃動作における発生力の効果を向上すること。以上より、モンハナシャコの打撃動作を Fig. 3 と Fig. 4 に示す打撃機構としてモデル化した。

### 3. 2 種類の弾性要素に着目したシャコ規範型打撃機構モデルの構築

本章では、Fig. 3 に示すモンハナシャコの打撃機構を規範とした回転・並進方向に弾性要素が作用する拮抗駆動機構の動作モデルの構築と実機による打撃実験について記述した。なお、本研究では、実際の筋肉の収縮特性と同様の収縮特性を示す空気圧人工筋を筋肉要素とした。

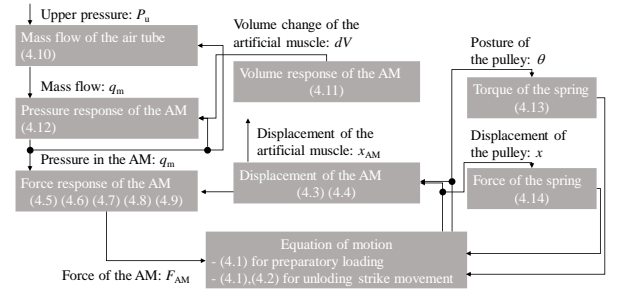


Fig. 5 弾性要素の設計のための繰り返し計算モデル。図中括弧内の数字は本論における式番号を示す。AM は人工筋肉を意味する。

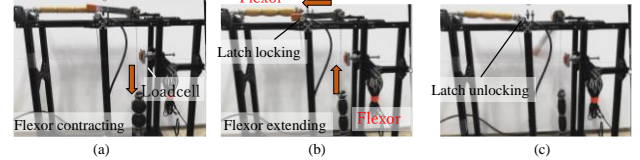


Fig. 6 モンハナシャコの打撃動作を規範とした回転・並進方向へ作用する 2 種類の弾性要素を有した打撃機構.

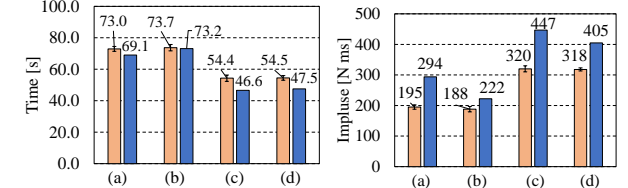


Fig. 7 打撃機構のシミュレーションと実験の結果。橙色は実験値、青色は解析値を示す。

### 3.1 シャコ規範型打撃機構のモデル化

プーリの回転・並進方向への運動方程式は、それぞれ式(1), (2)で記述される。各パラメータは Table 1 に示す。

$$(M_a + M_p + M_c)\ddot{x} = F_s - F_{EX} - (I_a + I_c)\ddot{\theta} \sin \theta \quad (1)$$

$$(I_a + I_p + I_c)\ddot{\theta} = R_{p,EX} F_{EX} - R_{p,FL} F_{EL} + T_s - R_a \left( \frac{M_a}{2} + M_c \right) (\ddot{x} \cos \theta - g \sin \theta) \quad (2)$$

この時、人工筋肉の発生力は式(3)と記述される。

$$F_{AM}(x_{AM}, P) = (P G_s(x_{AM}) - G_l(x_{AM})) / G_e(x_{AM}) \quad (3)$$

さらに、人工筋肉の内部体積は式(4)と記述される。

$$V = G_v(x_{AM}) \quad (4)$$

人工筋肉へ流入する質量流量は式(5)と記述される。

$$q_m = \begin{cases} C R_u \rho_0 \sqrt{(T_0 + 20)/(T_u)} \sqrt{1 - \left( \frac{P}{P_u} - b_u \right) / (1 - b_u)}^2, & (b_u \leq \frac{P}{P_u} \leq 1) \\ C R_u \rho_0 \sqrt{(T_0 + 20)/(T_u)}, & (0 \leq \frac{P}{P_u} < b_u) \end{cases} \quad (5)$$

人工筋肉内部の圧力変化は式(6)で記述される。

$$dP = \left( R T_u q_m - P \frac{dV}{dt} \right) \left( \frac{V}{K_a} - 1 \right) \quad (6)$$

### 3.2 外骨格の有無に関する打撃機構の動作シミュレーションと打撃実験

2 種類の外骨格の弾性要素と筋肉要素の合力による打撃力の向上をシミュレーションと実験から検証した。

#### 3.2.1 シミュレーションと実験の環境と条件

シミュレーションのフローチャートを Fig. 5 に示す。Fig. 6 に示す実機により、各条件で 3 回ずつロードセルを打撃して発生力を計測し、平均と標準偏差を結果とした。なお、各弾性要素の影響を明らかにするため、回転・並進方向に

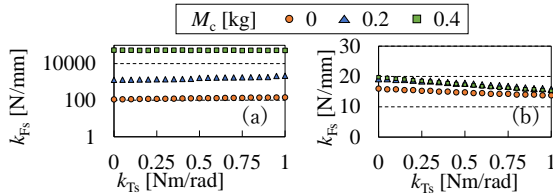


Fig. 8 (a)アームの打ち出し時間を最小化する. (b) アーム速度を最大にする弾性要素の組み合わせ.

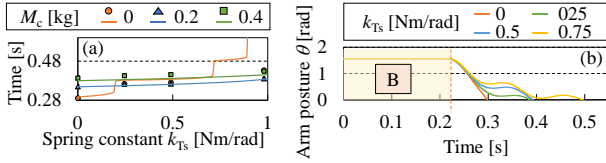


Fig. 9 予備動作に要する時間と回転方向に作用する弾性要素の弾性係数の関係.

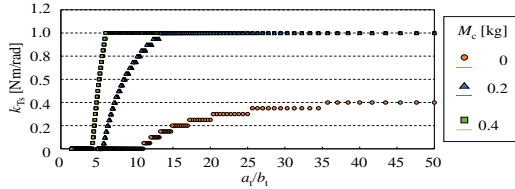


Fig. 10 重みつけたアームの屈伸に要する時間を最小化する重みと回転方向に作用する弾性要素の弾性係数の関係.

作用する弾性要素有無について4条件とした.

### 3.2.2 シミュレーションと実験の結果

実験とシミュレーションの結果を Fig. 7 に示す. 弾性要素の組み合わせにより, 打撃力が最大 1.7 倍に増加した. またシミュレーションと実験の結果における傾向が近いことから, モデルの妥当性が示された.

## 4. 2 種類の弾性要素に関する打撃速度とアームの屈伸に関する設計

本章では, 第3章に記述した打撃機構のモデルを応用し, 回転・並進方向に作用する弾性要素の設計論を構築した. なお, シミュレーションと実験の条件は3章と同様である.

### 4.1 打ち出し動作と予備動作

シミュレーションにより, アームの伸展に要する時間を最小化し, アーム先端の速度を最大化する回転・並進方向に作用する弾性要素の弾性係数の組み合わせを導出した (Fig. 8). また, 予備動作に要する時間と回転方向に作用する弾性要素の弾性係数の関係を導出した (Fig. 9).

### 4.2 重み付けした設計関数の導出と弾性設計

打ち出し動作と予備動作に要する時間に関して, 重み付けをする. Fig. 10 から, 重み付けをもとに回転方向に作用する弾性要素の弾性係数を決定する. Fig. 8(b)より, アームの速度を最大化する並進方向に作用する弾性要素の弾性係数を決定できる. 以上より, 要求される屈伸に要する時間の中で最速のアーム速度となる機構の設計ができる.

## 5. エネルギー蓄積と損失低下のための楕円回転機構

モンハナシャコは, 捕脚先端に楕円軌跡を描かせながら打撃する. 本章では, 楕円回転する捕脚機構の打撃による

発生力向上する打撃機構について記述した.

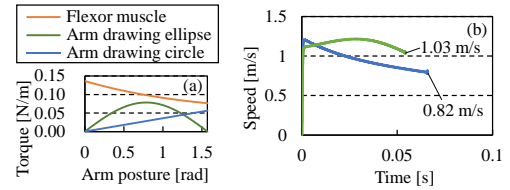


Fig. 11 シミュレーションによる (a)予備動作における蓄積できる弾性エネルギーの比較. (b)打ち出し動作におけるアーム速度の比較. (a)と(b)で凡例は共通である.

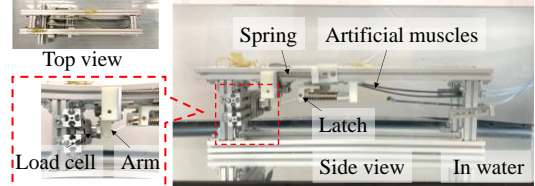


Fig. 12 モンハナシャコの打撃動作を規範とした水中打撃機構.

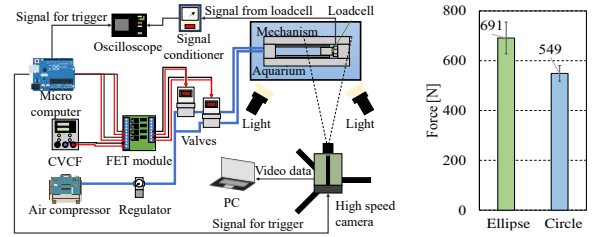
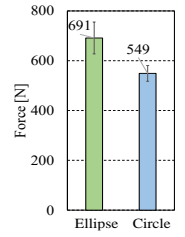


Fig. 13 水中における打撃実験の環境.

Fig. 14 楕円・円回転機構の発生力比較.



### 5.1 楕円回転打撃機構の動作モデル

楕円回転機構と円回転機構の水中における運動方程式は式(7)で記述される.

$$(I_a + I_p)\ddot{\theta}(t) = F_{AM}(t)R_p + T_s + (1/2)R_s(m_a + \rho V_a)g \cos \theta(t) - T_d(t) + T_c(t) \quad (7)$$

また, 弾性要素によるトルクは式(8)により記述される.

$$T_s = \begin{cases} F_s(t)d_a \sin \theta(t) & \text{(The arm tip has an elliptical trajectory)} \\ F_s(t)R_p & \text{(The arm tip has a circular trajectory)} \end{cases} \quad (8)$$

### 5.2 楕円回転機構と円回転機構の駆動シミュレーション

Fig. 11 に楕円回転機構と円回転機構に関する弾性エネルギーの蓄積と運動エネルギー損失に関するシミュレーションの結果を示す. Fig. 11 (a)より, 屈曲筋によるトルクよりも, 弾性要素のトルクを小さく設計する場合, 楕円回転機構は弾性要素によるトルクを大きく発揮できることがわかる. また, Fig. 11 (b)より, 打ち出し動作時において, 楕円回転機構は円回転機構に比較して, 水の抵抗により運動エネルギーの損失を軽減できることを示した.

### 5.3 楕円回転機構に関する水中打撃実験

5.2 節におけるシミュレーションから, 楕円回転機構において, 弾性エネルギーに大きな弾性エネルギーを蓄積でき, 打撃動作時には水の抵抗を小さく低減できることから, 運動エネルギーの損失を低減でき, 打撃における発生力を強化できると推定された. 本節では, Fig. 12 に示す実機により, Fig. 13 に示す実験の環境を構築し, 楕円回転機構と円回転機構に打撃における発生力を計測・比較した. 各計測は 6 回ずつ行い, 平均と標準偏差を結果とした.

実験の結果を Fig. 14 に示す. 楕円回転機構では, 円回転機構に比較して 1.26 倍の打撃における力を発生した. シミ

ュレーションでは、楕円回転機構が1.27倍の速度で打撃すると推定された。以上より、楕円回転機構では弾性エネルギーを大きく蓄積し、水の抵抗による損失を小さく低減し、打撃における発生力を強化したと考える。

## 6. キャビテーションにより打撃効果を強化可能な機構の開発

モンハナシャコは打撃箇所のみで発生させたキャビテーションにより発生力の影響を強化する<sup>(6)</sup>。そこで、打撃箇所のみで発生させたキャビテーションにより、発生力を強化する機構について記述した。

### 6.1 打撃箇所以外でのキャビテーション発生を考慮した打撃機構

キャビテーションは、高速で動作するアーム周囲の圧力低下により生じる。そこで、定式化した一定速度のアーム周囲の圧力と水蒸気圧との関係から、7.96 m/s以上の速度でキャビテーションが発生すると推定した。一方で、式(7)の運動方程式をもとにアームの先端速度を推定するシミュレーションを行った。その結果、アーム先端の速度は1.1 m/sであり、打撃箇所以外ではキャビテーションが発生しないと推定された。一方で、打撃箇所では、対象物とアームの間の圧力が大きく低下すると予想される。さらに、圧力の低下は複雑現象であり、モデル化が難しい。そこで、実機実験より打撃箇所におけるキャビテーションの発生の有無について検証し、さらに、キャビテーションによる発生力の計測より、打撃に与える影響を明らかとした。

### 6.2 キャビテーション発生確認実験

実験環境を Fig. 13, 14 に示す。ステンレス球を打撃する打撃機構のハイスピードカメラによる撮像から、キャビテーション発生の有無を検証した。

Fig. 15 に示す撮像より、開発した機構は打撃箇所以外では、設計通りキャビテーションを発生せず、打撃箇所のみでキャビテーションを発生することがわかる。

### 6.3 キャビテーション発生による発生力の計測実験

打撃箇所のみでキャビテーションを発生する機構を開発し、打撃箇所における発生力を計測した。なお、実験の環境は Fig. 13 と同様である。なお、6回計測し、アーム衝突による発生力とキャビテーション発生時のピークの平均と標準偏差を結果とした。

Fig. 16 に示す計測された打撃力の波形の一例より、アームの一度の衝突により、2回のパルスが生じた。Fig. 17 より、キャビテーション発生によるパルスのピークより、アーム衝突によるパルスのピークは2.13倍であった。また、アーム衝突からキャビテーションによる発生力が生じるまでの時間はおよそ0.6 msであった。モンハナシャコによる打撃では、打撃箇所におけるキャビテーションの発生によって打撃による発生力が強化されると考えられていることから、0.6 ms という短時間における2度の連続した発生力による打撃効果の向上に関して、今後検証していく。

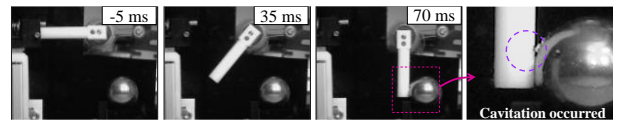


Fig. 15 アームの衝突とそれに伴うキャビテーション発生時のハイスピードカメラによる撮像。

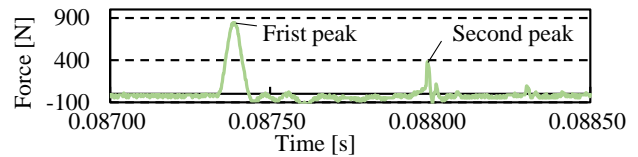


Fig. 16 打撃箇所のみでキャビテーションが生じる打撃動作における発生力の一例。

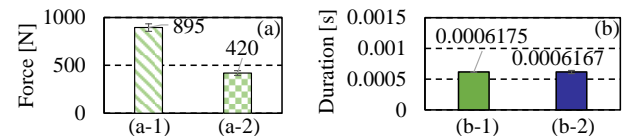


Fig. 17 アームの衝突時とキャビテーションが生じるときの発生力の関係。

## 7. 結言

本論文では、空圧ソフトアクチュエータが有する高いコンプライアンス特性、高い出力密度を生かし、関節の拮抗駆動ができ、高速打撃に伴う発生力を強化する機構の実現を目的としたモンハナシャコの打撃動作を規範とした高速打撃機構の設計論について記述した。

シミュレーションと実験の結果から回転・並進方向に作用する2種類の弾性要素に関して、アームの屈伸に関する時間を設定し、アーム速度を最大化できる設計手法を確立した。さらに、水中における打撃速度を強化できる楕円回転機構を開発し、打撃箇所のみでキャビテーションを発生できる機構の設計手法について記述した。

今後は、提案する打撃機構を人間との共同空間で作業する高速動作ロボットなどへ応用する。さらに、打撃箇所におけるキャビテーション発生により生じる短時間での2連続の発生力が打撃効果に与える影響を検証していく。

## 参考文献

- (1) H. Mochiyama, H. Fujimoto, "Impact manipulation by a hyperflexible robotic manipulator," In Proc. of 2007 IEEE/ASME int. conf. on advanced intelligent mechatronics (AIM 2007), pp. 823-829, Zurich, Switzerland Sept 2007. .
- (2) Y. Abe, T. Almeev, J. Yi, S. Katsura, "High-Power and Precise Actuation System with Direct Drive and Variable Structured Elasticity," in Proc. of IEEE Int. Conf. on Mechatronics, Ilmenau, Germany, pp.396-401, Mar., 2019.
- (3) R. Niiyama, A. Nagakubo, Y. Kuniyoshi, "Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System," in Proc. of 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), Roma, Italy, pp. 2546-2551, Apr., 2007.
- (4) S. N. Patek, W. L. Korff, R. L. Caldwell, "Deadly strike mechanism of a mantis shrimp," Nature, Vol. 428, pp. 819-820, Apr., 2004.
- (5) S. M. Cox, D. Schmidt, Y. Modarres-Sadeghi, S. N. Patek, "A physical model of the extreme mantis shrimp strike: Kinematics and cavitation of Ninjabot," in Bioinspir Biomim, Vol. 9, Issue 1, 16014 May, 2014.