

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20246125

研究課題名（和文） 生物規範型水中ロボットの基盤技術の確立と応用展開

研究課題名（英文） Establishment of basic technology of biomimetic underwater vehicles and applications

研究代表者

加藤 直三（KATO NAOMI）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：00138637

研究成果の概要（和文）：

自然海岸や干潟は沿岸域の環境モニタリングをより安全かつ効率的に行うために、水陸両用ロボットで陸上から遠浅の地域まで幅広く自動計測する機器が必要となる。本研究は、環境にやさしい生物規範型水中ロボットの、干潟での環境計測といった実環境への展開を目指して、干潟での遊泳と歩行の機能の多機能性と、また干潟において波浪中を移動する外乱に対するロバスト性に関する基盤技術を確立するため、プロトタイプを製作し、理論と実験の両面から、実環境への展開の検証を行った。

研究成果の概要（英文）：

Aiming at the automatic monitoring of environments along natural coastal areas and tidal flats, we designed and developed an amphibious robot equipped with fin actuators mimicking the locomotion of tortoises and sea turtles. We adopted the advantages of these 2 creatures in a robotic turtle, namely, the lift-based swimming mode that sea turtles use and the quadrupedal locomotion tortoises use. The swimming and walking performances of the robotic turtle were estimated by experiment and simulation. It has maneuverability in forward and backward motion, descending and ascending in the vertical direction, and turning at the same position using four fins. It also has a walking performance on water bed even in waves.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2008年度 | 6,500,000 | 1,950,000 | 8,450,000 |
| 2009年度 | 12,200,000 | 3,660,000 | 15,860,000 |
| 2010年度 | 14,500,000 | 4,350,000 | 18,850,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 33,200,000 | 9,960,000 | 43,160,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：船舶海洋工学

キーワード：水陸両用、遊泳、歩行、生物規範型、外乱、多機能性、干潟、環境計測

1. 研究開始当初の背景

これまで研究代表者は、波や潮流の外乱の多い浅海域において停止状態で観測や作業を行う高精度操縦性能を持つ水中ロボットの研究開発を行ってきた。その水中ロボットの推進装置として、魚

の胸ひれの運動解析から、剛体平板を持つ胸ひれ運動装置を用いた。胸ひれの運動を前後運動、ひねり運動、上下運動の3つの運動の組み合わせる胸ひれ運動装置を前後左右2対取り付けられた水中ロボットは、その場旋回、その場上昇・下降、平行

移動など色々な操縦性能を示し、潮流中の誘導制御や波浪中における姿勢制御が作動することを確認した。さらに、ひれ運動によって外部に対してダメージを与えず、しかも高推力を発生する柔らかさを持った胸ひれ運動装置の実現化に向けて、1) フレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) を使い、胸ひれが前後運動、ひねり運動、上下運動のみならず、たわみ運動や伸縮運動を行う胸ひれ運動装置を開発し、2) その流体弾性解析を行い、3) CFD を用いた水中ロボットの運動シミュレータを開発した。これらの研究成果を踏まえ、その特性を生かす場として、干潟での潮上帯、潮間帯、潮下帯にわたる環境計測を設定した。これは、干潟が閉鎖性海域における環境浄化における役割が大きいことが認識されているが、その環境計測は人手に頼っているのが現状であり、しかも機械を用いるにしても、海中と陸上との移動可能なもので、計測する地盤を含めた環境をなるべく乱さないという制約が付けられる。この問題を解決する手段として、弾性ひれによる歩行と遊泳の二つの機能を持たせることを考える。

2. 研究の目的

自然海岸や干潟は沿岸域の海洋環境にとって重要な役割を担っているため、環境モニタリングを行なう必要がある。この作業を調査環境に応じて一体のロボットで行うことができれば効率的であると考えられる。そのためには、水陸両用ロボットの開発が必要となる。キャタピラやプロペラによる移動方法はそれだけでは移動範囲に限られるばかりでなく、調査水域の環境破壊や砕波帯など流れの速い水中での安定性などの問題点も挙げられる。そこで、不整地や波や流れの中でも陸から海中まで移動ができる水陸両棲生物に着目し、その生物の運動メカニズムを解明することで、そのロボット開発に生かすことが可能となる。水陸両棲生物には、カバやカモノハシなどの哺乳類、ワニ、ウミヘビ、カメなどの爬虫類、カエルやイモリなどの両生類、ペンギンやウなどの鳥類がある。その中でカメは、甲羅に囲まれた固い胴体に歩行と遊泳を掌る前肢および後肢が付いており、その運動メカニズムは環境モニタリングを行う水陸両用ロボットに生かすことができると考えられる。カメの現生種は約 300 種とされ、ウミガメ、リクガメ、ドロガメ、スッポンなどの上科に分類される。これまでも遊泳のみを行うウミガメロボットの研究や歩行と遊泳を想定したウミガメロボットの研究があるが、従来のウミガメロボットは歩行動作の実現が困難であった。それはウミガメの歩行方法が胴体を地面に擦りながら移動するために生まれる摩擦抵抗が原因だと考えられる。リクガメとウミガメの歩行と遊泳の運動解析を行い、さらに 4 自由度を持ったマニピュレーターによりリクガメ、ウミガメそれぞれの歩行動作を再現し、実験によって歩行性能の評価を行なった。さらに、リクガメの歩行、ウミガメの遊泳を可能とする自律型ロボットを設計・製作し、その性能評価を行

った。

3. 研究の方法

3.1 ウミガメの遊泳

実験に使用したウミガメは、甲長 76.5cm 体重 59.7kg のアカウミガメも用いた。左右の鱗面積は、右前肢 504.4cm²、左前肢 490.0cm² である。実験は神戸大学海事科学部回流水槽にて行った。この回流水槽は、型式：水平循環型 本体：15.0mL×5.4mW×2.8mH、流速：0.2m/s～2.0m/s となっている。またこの回流水槽には両側面に 1.37mL×1.11mH×4 枚の観測窓があり、底面には 1.03mL×0.73mW×4 枚の観測窓がある。前肢の三次元運動解析を行うため、左右両方向ならびに、下からの同時撮影を行った。ただし、ウミガメの胴体をロープで巻き、さらにそこからロープを出し、水槽に固定して指示棒にした結んだ状態で撮影を行った。解析点は、図 1 に示すように、左右前肢の肘関節、手関節、先端にとった。

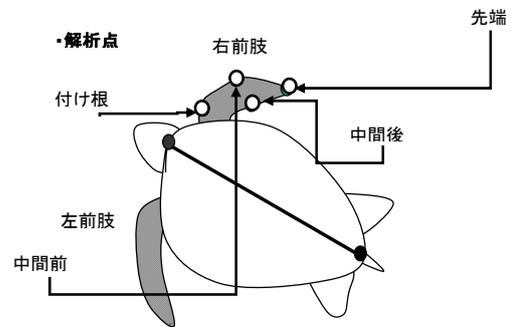


図 1 前肢の運動解析点

3.2 リクガメの歩行

Walker はリクガメの中のニシキガメの歩行を映像と X 線で調べ、骨格構造と前肢および後肢の運動の関係を明らかにした。それによれば、前肢と後肢の骨格構造は同じであり、前肢は 3 自由度の肩鎖関節、上腕、1 自由度の肘関節、前腕、2 自由度の手関節と手から成り立っている。前肢の定量的な運動データを得るために、クサガメ (甲長 23cm、前肢の長さ 4 cm、後肢の長さ 4cm) を供試体とした。カメの左前足の肘関節、手関節、及び甲羅上の座標設定が必要な箇所にマーカーを



図 2 クサカメに取り付けたマーカー

装着し (図 2 参照)、歩行動作を CCD カメラにより

上方と側方の二方向から同時に撮影を行った。解析ソフトでマーカーのトラッキングを行い、足先、膝の座標を股関節を原点とした三次元物体固定座標として求めた。座標の原点は肩鎖関節にとった。

3.3 マニピュレータを用いた歩行性能実験

前節で観察したように、カメの前肢の4自由度の運動を作ることができるマニピュレータを製作した(図3)。このマニピュレータは砂をかいてレール上を動く。レール上の動きはポテンショメータにより、ハンドに加わる力は六分力計で計測した。上腕と前腕の長さは150mmである。前後運動角度、捻り運動角度、上下運動角度、前腕屈曲角度は、それぞれ $\pm 70^\circ$ 、 $\pm 70^\circ$ 、 $\pm 50^\circ$ 、 0° から -110° までの稼働域となっている。レールとマニピュレータの間に摩擦が生じるため、その静摩擦分をマニピュレータをプーリで引っ張る装置を取り付けた。ハンドモデルとして2種類のものを用いた。リクガメ用として70mm×70mmの平板を、ウミガメ用として、150mm×125mmの平板を先端に取り付けた。

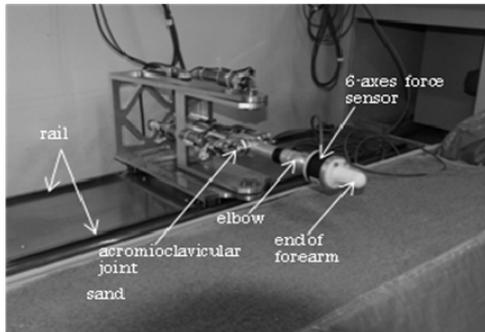


図3 歩行実験用マニピュレータ

3.4 カメ型脚部を持つ水陸両用ロボットの設計と製作

これまでの議論をもとに、沿岸域の海洋環境モニタリングを行うカメ型脚部を持つ水陸両用ロボットの設計と製作を行った。陸上から浅水域までは歩行を行い、砕波帯を超え、ある程度水深が大きくなったところから、遊泳に切り替えることを想定した。必要に応じて、水深が大きいところでも海底においても歩行を行う。

ロボットの遊泳方法には、これまで当研究室で研究・開発を行ってきた胸ひれ運動装置(8, 9), 10)の機構を用いる。これは、前後運動、捻り運動、上下運動の三つを組み合わせるもので、効率を重視した揚力型と推力を重視した抗力型の二種類がある。

ロボットの歩行方法として、ウミガメ型とリクガメ型の二種類があることを前節で述べたが、それぞれ次の特徴を持つ。

ウミガメ型

- ・ 転倒の心配がなく安定
- ・ 地面の状態が胴体姿勢に強く影響
- ・ 地面との摩擦のため水平方向に力

が必要

リクガメ型

- ・ 転倒する恐れがあり比較的不安定
- ・ 胴体姿勢にある程度の自由度が存在
- ・ 自重支持のため鉛直方向に力が必要

ここでは、前進方向の推力を重視して、リクガメ型を採用する。

開発するロボットの構成を図4に示す。ロボットの構成要素は大きくつぎの4つに分けられる。

- (1) 脚部ユニット
- (2) 制御容器
- (3) 浮力調整装置
- (4) フェアリングカバー

各水密容器は耐水深度10mで設計を行っている。本研究では、これらのハードウェアに加え制御プログラムの開発も行った。なお、ハードウェアの設計は3次元CADソフトウェアSolid Worksを使用して行った。またプログラムの開発は、計測制御プログラム開発環境LabVIEWを用いて行っている。

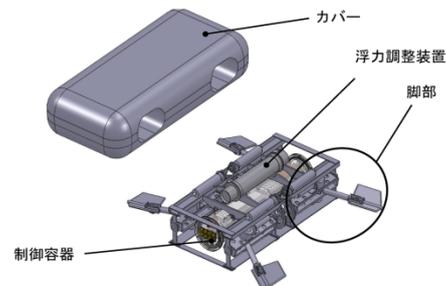


図4 ロボットの構成

肩周りに3自由度(以下 上下運動:フラッピング, 前後運動:ローイング, 捻り運動:フェザリング), ヒジ周りに1自由度の計4自由度をもつアクチュエータが必要となる。肩関節には差動歯車機構を採用し、各自由度の運動の干渉が起きないようにした。

4脚ロボットの歩行において、足の運び方は様々なものが考えられるが、今回は1脚ずつ順番に足を持ち上げるクロール歩容とよばれるものを採用している。歩行に関するパラメータは、1周期辺りの歩幅:0.54[m], 脚先端の接地高さおよび持ち上げ高さ:0.2[m], 0.05[m](肩中心からの鉛直相対位置)として、歩行周期を変更してシミュレーションを行った。

フェアリングカバーの設計にあたって、汎用熱流体解析ソフト「FLUENT」を使用した。ロボット本体の仕様に合わせて、干渉のないように計算モデルを複数作成し一様流中でモデルに働く流体力を計算した。そのモデルの中で最も抵抗値の少なかったモデルを基にFRPでフェアリングカバーを製作した。次に、ロボットのモータの限界トルク、脚のローイング運動、歩行時の接地面との干渉と

いった機械的制約からヒレ形状を決定し、ABS樹脂でヒレを製作した。

図5に製作したカメラ型脚部を持つ水陸両用ロボット“RT-I”を示す。全長1.68(m)、胴体幅0.73(m)、胴体高さ0.55(m)、質量80.0(Kg)である。



図5 カメラ型脚部を持つ水陸両用ロボット“RT-I”

3.5 ロボットの歩行性能

歩容については実際のヌマガメの歩容に近いクロール歩容を採用した。この歩容では腕を一つずつ持ち上げて歩行動作を行い、常に三本以上の腕で胴体を支持するため静的安定性が保たれる歩行動作である。

また、実海域での運用を想定した場合、歩行する水底が平坦でないことや、波などによる外力が作用することが考えられる。そうした状況の下ではロボットが歩行中にバランスを崩しやすく、歩行時の安定性がより重要となる。我々はロボットの安定性を増加させる方法として、歩行動作に重心移動を導入することを考えた。その際、ロボットの安定性の評価基準として安定余裕を採用した。

腕先の軌道、動かし方の異なる歩行パターンを数種類作成して歩行シミュレーションにより比較した結果、歩行性能の高かった2パターンについて実際にロボットで動作を再現し、実験を行った。実験に使用した歩行パターンをそれぞれ歩行パターン1、歩行パターン2と呼ぶ。歩行パターン1は腕先の軌道が長方形であり、一つの腕が地面を掻くのに4ステップ、合計16ステップで一周期分の歩行動作を行う。歩行パターン2は腕先の軌道が直角三角形であり、一つの腕を掻くステップを歩行パターン1から1ステップ減らした3ステップとし、合計12ステップで一周期分の歩行動作を行う。歩行パターン2においては歩行ステップの削減による歩行速度の上昇と、モーター必要回転数の削減による消費エネルギーの低減が見込まれる。

4. 研究成果

4.1 ウミガメの遊泳の解析結果

前肢のx-y平面内の軌跡から(図6)、前から後ろに前肢を漕ぐとき、最高端では甲羅に接するほど、内側に取り込み、前に返すときは、内側に軌跡を取っていることがわかる。また前肢のx-z平面内の軌跡から、楕円の軌跡を描いていること

がわかる。右前肢の中間の捻り角度(上向きが正)の時間変化から、最初は、前肢を一番前にある状態を示す。捻り角度の稼働範囲は約 100° に達することがわかる。

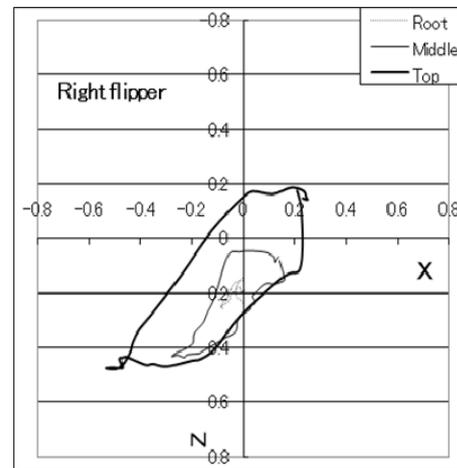
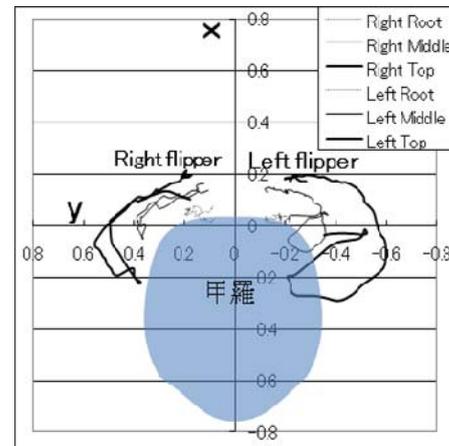


図6 ウミガメの前肢の運動軌跡

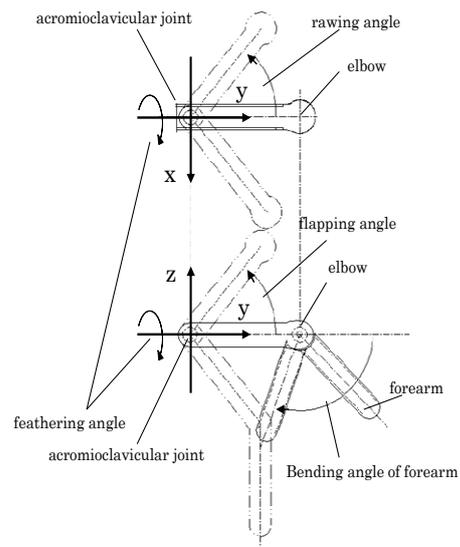


図7 座標系と定義

4.2 リクガメの歩行の解析結果

データ取得時における歩行速度は 0.13m/s, 歩行周期は 1.3s, 着地率 (前肢が 1 周期の間に地面に着いている割合) は 0.78 であった. 各関節の動きを逆運動学によって求めた. 図 7 に, 座標系と角度の定義を示す. ここで, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ を前後運動動角度, 捻り運動角度, 上下運動角度, 前腕屈曲角度とする.

図 8 に, 各関節角度の時間変化を示す. データ取得時における歩行速度は 0.13m/s, 歩行周期は 1.3s, 着地率 (前肢が 1 周期の間に地面に着いている割合) は 0.78 であった. 各関節の動きを逆運動学によって求めた. パワーストローク (0 秒 から 0.6 秒の間) では, 前後運動動角度はほぼ前方から真横まで (-70° から 10°) の間, 捻り運動角度は 5° から 49° の間, 前腕屈曲角度は -75° から -115° の間で変化しており, 前腕を地面にほぼ直角にして, 地面を蹴っていることがわかる. リカバリストローク (0.6 秒 から 1.3 秒の間) では, 前腕屈曲角度は -20° に達しており, 前腕が地面から離れていることを示している. 上下運動角度はパワーストロークとリカバリストロークの間でそれほど変化がない.

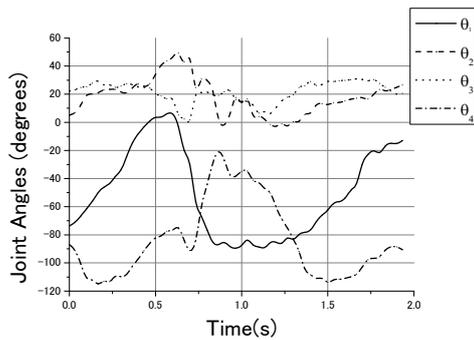


図 8 関節角度の時間変化

4. 3 マニピュレータを用いた歩行性能実験結果

リクガメの動きについて, 三つの動きのパターンを用いて歩行性能を調べた. タイプ (a) は, パワーストローク時に前腕を地面に対して直角に動かす. タイプ (b) は, パワーストローク時に前腕を突き出す形で地面を引っかく動きをする. タイプ (c) は, パワーストローク時に前腕を蹴り出す動きをする. 周期は 10 秒とした. 実験では, 地面からの前腕先端までの沈下量を 10 mm, 15 mm, 20 mm and 25 mm の 4 段階に変化させた. 沈下量が 15mm を超えると推進効率についてはタイプの差が見られないこと, 推力はタイプ (a) の場合, 沈下量とともに増加し, 三つのタイプの中で最も大きい (図 9). 一方, 他の二つのタイプでは, 沈下量が大きくなっても, 推力を増えないことがわかる. このことから, 三つのタイプの中では, タイプ (a) が歩行性能が最も優れていると言える.

ウミガメの動きでは, 地面に対して直角にして推力を得るタイプ (d) と, 地面に対して 45° 傾

斜して推力を得るタイプ (e) の二種類を用いた. 前後運動は同じ範囲である. 這うタイプのウミガメが砂浜を移動する時, 胴体と砂との間の摩擦は, 自重から前肢, 後肢で出す上向きの力を差し引いた大きさに依存する (図 10 参照). タイプ (e) はタイプ (d) より, 推進効率, 前進方向の推力, 上方の推力とも大きい. このことから, タイプ (d) よりもタイプ (e) の方が, 歩行性能が優れていることがわかる.

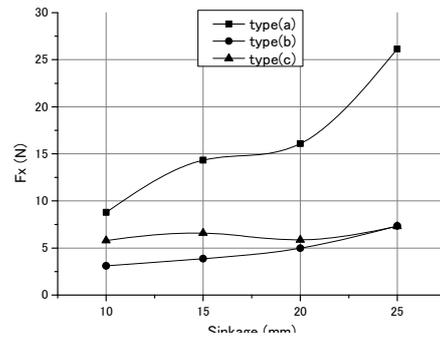


図 9 リクガメの動きの違いによる推力

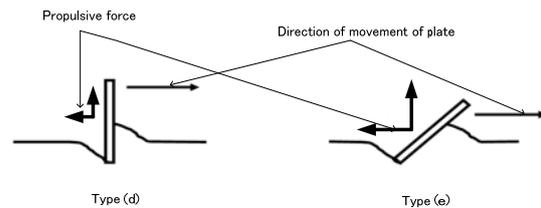


図 10 タイプ (d) とタイプ (e) の平板が出す力



図 11 波浪中における実験

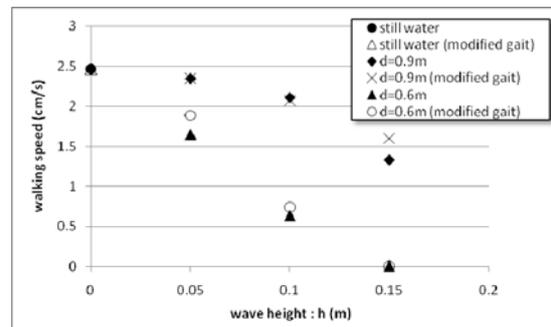


図 12 波高による歩行速度の変化

4. 4 ロボットの歩行性能の結果

波浪中の歩行(図11)では波に逆らって前進するため前進に必要な推力は大きくなるが、波によりボディが上下動を行うことで荷重を支えるのに必要な力が小さくなる。波浪中における消費エネルギーは波による水平方向及び上下方向の力の影響を受け、水平方向の影響が大きければ消費エネルギーは増加し、上下方向の影響が大きければ消費エネルギーは減少すると考えられる。波高の増加に伴い歩行速度が低下していることが分かる(図12)。また、水深が浅くなるほど、波の影響を大きく受けて歩行速度が低下しており、波高の増加に伴う歩行速度低下の割合が大きくなっている。一方、波長の変化に伴う歩行速度の推移について、波長の増加に伴い歩行速度が低下していることが分かる(図13)。

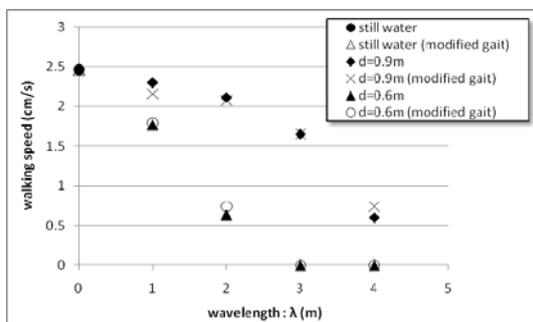


図13 波長による歩行速度の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計12件)

- ①Junichi Shimoya, Kazuki Maeda, Eishi Yoshida, Naomi Kato, Estimation of Swimming and Walking Performances of a Robotic Turtle, Proc. ISOPE 2011, 査読有, accepted, 2011
- ②河村 嘉将, 下谷 純一, 吉田 英司, 加藤 直三, 鈴木 博善, 千賀 英敬, ヒレ型アクチュエータを有する水陸両用ロボットの設計と開発, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 査読無, 10号, 2010, 149-152
- ③Y. Kawamura, J. Shimoya, E. Yoshida, N. Kato, H. Suzuki and H. Senga, Design and Development of Amphibious Robot with Fin Actuators, Int. J. of Offshore and Polar Engineering, 査読有, Vol. 20, No. 3, 2010, 175-180
- ④加藤 直三, 水陸両棲生物の歩行と遊泳の運動メカニズム, バイオメカニズム学会誌, 解説, Vol. 34, No. 3, 2010, 195-202
- ⑤Y. Isobe, N. Kato, H. Suzuk, H. Senga, Motion Analysis of Sea Turtle with Prosthetic Flippers, Proc. ISOPE 2010, 査読有, 2010, 335-342
- ⑥H. Suzuki, Y. Fukui, S. Ueda, and N. Kato, Numerical Study on Motion Simulation with Control Algorithm of Biomimetic Underwater Vehicle, Proc. Of ISABMEC2009, 査読無, 2009 CD-ROM

- ⑦T. Takamura, N. Kato, and Y. Kawamura, Simulation of Dynamic Interaction between a Robotic Arm and Sand by 2D-Discrete Element Method, Proc. of ISABMEC2009, 査読無, 2009 CD-ROM
 - ⑧J. Shimoya, N. Kato, and Y. Kawamura, Estimation of Walking Performance of an Amphibious Robotic Turtle, Proc. of ISABMEC2009, 査読無, 2009 CD-ROM
 - ⑨H. Suzuki, N. Kato, Load characteristics of mechanical pectoral fin, J. Exp. Fluids, 査読有, Vol. 8, 2008, 759-771
 - ⑩N. Kato, H. Suzuki, Robustness of Biomimetic Underwater Vehicles under Disturbances, Advances in Science and Technology, 査読有, Vol. 58, 2008, 266-275
 - ⑪Y. Fukui, H. Suzuki, N. Kato, CFD-based Motion Simulator with Control Algorithm for Biomimetic Underwater Vehicle, Proc. AMEC2008, 査読無, 685-691
 - ⑫有吉友和, 加藤直三, 鈴木博善, 生物型水中ロボットののための弾性体胸鰭の開発, 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, 査読無, 第6号, 2008, 417-420
- 〔図書〕(計1件)
- 加藤直三他11名, エアロ アクア バイオメカニクス, 森北出版, 2010
- 〔その他〕

http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/~kato/basic_technology.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 直三 (KATO NAOMI)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号: 00138637

(2) 研究分担者

鈴木 博善 (SUZUKI HIROYOSHI)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 00252601

千賀 英敬 (SENGA HIDETAKA)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号: 60432522