

博士論文要旨

論文題名：車輪パドルを有するロボットのための 運動性能評価

立命館大学大学院理工学研究科
機械システム専攻博士課程後期課程

シェン ヤイ
SHEN Yayi

水陸混在災害現場において捜索・救助活動の支援を効率的に行うため、車輪と脚を統合した偏心パドル機構が提案されてきた。この機構は車輪型ロボットと脚型ロボットの欠点を克服し、それぞれの利点を活かした構造であり、パドルの突き出し量と傾きを制御することにより高い環境適応性を発揮する。本研究は、これまでに単一モジュールを用いて輪・脚機構の歩容に関する研究と水中におけるスラスト力特性に関する研究の結果を基にし、4つの車輪パドルモジュールからなるロボットの運動性能について評価する。

本論文では、まず車輪パドルモジュールを4つ組み合わせたロボットについて述べた。このロボットは防塵防水の設計になっており、環境に対するロバスト性が期待できる。またハードウェアとソフトウェアを含むこのロボットの統合的な制御システムをも紹介した。次に開発したロボットが様々な地形で移動できるようにハイブリッド移動モードを提案した。このハイブリッド移動モードを使用することで、平坦な床や荒れた草地、岩場や砂利道、さらには砂地のような柔らかい地形といった地上の移動も可能となる。脚モードと比較した場合、ハイブリッド移動モードは地形の変化に対応しながらパドルシャフトの位置を調整するだけで素早く車輪パドルの形態を変えることができる。ハイブリッド移動モードの有用性は実環境での実機実験を用いて検証した。草地、岩場、砂利、および平地(床)での走行実験の結果から、荒い地形でより多くのエネルギーを消費することが明らかになった。また脚モードと比較した場合、荒い地形でのハイブリッド移動モードの移動効率も平地での脚モードの移動効率とほぼ同じでありながら、その移動速度は秒当たり1体長弱に上昇した。

本論文では、砂環境などの柔らかい地形においてハイブリッド移動モードをロボットに適用した場合におけるロボットの移動性能についても述べた。本研究ではまずパドルと軟弱土との力学関係を理論的に誘導して実機による検証実験を行った。これによりパドルの地面に対する突き出し量が長いほどより大きな牽引力を生み出せるという結果が明らかとなった。次に水平及び垂直方向において、偏心パドルモジュールの運動評価実験装置を用いて、パドルの突き出し量の変化がロボットの移動性能に与える影響を検討した。実験結果より、パドルを突き出さずに車輪のみを回転させる移動形態では回転速度が速くなるほどスリップが起りやすくなる一方、パドルを突き出しながら車輪を回転させる移動形態ではスリップ量が減少し移動効率が

向上することが判明した。よって、軟弱土ではパドルを突き出す移動形態がロボットの移動効率向上に貢献するという結論に至った。屋外でロボットの実験を行った場合も同様に、パドルを突き出した場合の方が突き出さない場合よりもその移動効率が向上していることが分かる。このときにロボットの移動速度は車輪の回転速度とともに増加し、移動効率は移動速度が速いほどより大きくなる傾向が明らかとなった。屋内外での実験結果から、ロボットの移動性能はその自身の質量と砂の特性により変化することが明らかになった。従って、ロボットの慣性と砂の特性はスリップ量やパドルの沈下量に影響を与え、ロボットの移動性能に影響を与えるものだと考えられる。

本論文の最後に、水中において単一偏心パドルモジュールが往復パドリング運動と回転パドリング運動を行う場合の推進性能について述べた。偏心パドル機構における水環境での推進力を求める流体モデルを構築し、各運動モードによって生み出される推進力をシミュレーションと実機実験で導出した。結果により、回転パドリング運動モードは推進力において大きな振幅を持つ場合に優れている一方、往復パドリング運動モードは効率的であることが分かった。また、パドルシャフトを調整することで両運動は共に直線方向の推進力を生み出すものの、往復パドリング運動の場合にエネルギーの損失が大きく負の方向への推進力の発生も確認された。そこで、エネルギー効率を向上するために、人間のクロールを参考したフロントストローク運動という新たな推進方法を提案した。この運動は往復パドリング運動と比べ、3倍以上の推進力を生み出すことができ、推進効率も向上していることが確認できた。

以上より、偏心パドル機構を搭載したロボットはその移動性と適応性から、多様な地形に適用できる運動性能を有することが検証された。

Abstract of Doctoral Thesis

Title : Evaluation of Locomotion Performance for a Wheel-Paddle Robot

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering and Robotics
Graduate School of Science and Engineering
Ritsumeikan University

シェン ヤイ
SHEN Yayi

To help the human beings conducting search and rescue tasks after disasters, the eccentric paddle mechanism was proposed for robot to access amphibious terrains. The design concept is to balance the advantages and disadvantages in both wheeled robot and legged robot, so as to improve the mobility. The reconfigurability of the eccentric paddle mechanism endows the robot with high adaptability in different situations. Previous work has analyzed the motion modes on a single module prototype. In this thesis, we evaluate the locomotion performance of a robot that is composed of four eccentric paddle modules.

First, a robot prototype that consists of four wheel-paddle modules has been designed and fabricated. Considering the severe environment that the robot will be sent to, necessary protection measures such as waterproof and sandproof schemes are adopted. Besides, a complete control system has been constructed, including hardware and software.

Based on the new fabricated robot prototype, a hybrid locomotion mode is proposed for traversing terrestrial terrains, which include normal flat floor, rough grass, big stones, small gravels, or even soft terrain like sand. The reason of using this hybrid mode is that the previous legged modes were only suitable for flat ground, but can not be applied to rough terrains directly. And comparing with them, the hybrid mode is easier to be controlled. While dealing with variable terrain situations, the configuration of the wheel-paddle can be transformed quickly among wheel-support, hybrid-support and paddle-support by only adjusting the location of the paddle shaft. And during usual locomotion, only the wheel is actuated to generate traction force, which is more efficient.

The robot performing with the hybrid mode is primarily verified in rigid terrains, including three normal rough terrains (grass, stone, gravel) and one flat terrain (floor). It is found that the robot consumes more energy in rough terrains. But comparing with previous legged modes, the efficiency of the hybrid mode in rough terrains is similar with the legged modes on flat ground. In addition, the locomotion speed is increased, which is near one body length per second.

Then, the trafficability of the robot with hybrid mode in sand is investigated particularly due to the special properties of soft terrain, which makes the interaction between the robot and the terrain more complex and variable. First the paddle terredynamics is studied theoretically and experimentally. The results have shown that longer protruding length of the paddles can generate larger traction force. To find out how the protruding paddle length affects the locomotion performance, an indoor testbed that allows one wheel-paddle module moving freely in horizontal and vertical directions is built. It is found that the wheel-support configuration is easy to slip at high locomotion speeds, while the protruding paddles have effectively reduced the slippage and increased the efficiency. The locomotion performance of the whole robot in outdoor sand is also evaluated. The locomotion speed increases with the rotational speed of the wheel, while the efficiency tends to be better at higher locomotion speed. From the evaluation in both indoor testbed and outdoor field, it is found that the system inertia and the sand properties affect the slippage and sinkage between the robot and the soft terrain, so as to affect the locomotion performance.

At last, the propulsion performance of one wheel-paddle module with different swimming modes are explored. The hydrodynamic forces generated by the oscillating paddling mode (fish-like) and the rotational paddling mode (propeller-like) are compared theoretically and experimentally. The results have shown that the rotational mode is superior in generating large amplitude of thrust, while the oscillating mode is more efficient. Both of them can produce linear directional thrust when adjusting the location of the paddle shaft. However, large negative thrust was found in oscillating mode, which is a waste of energy. To further enlarge the thrust amplitude in oscillating mode and increase the propulsion efficiency, a novel front crawl stroke (human-inspired) is proposed. It is verified that the front crawl stroke can generate more than three times net thrust than the oscillating mode, and has increased the propulsion efficiency as well.

The evaluation of the locomotion performance has further verified the mobility and adaptability of the configurable wheel-paddle robot in various field terrains. It also inspires the future work towards real application in amphibious environment.