モグラの掘削動作を参考にした土中推進探査機の開発

—第2報：3次元方向操舵手法—

Research and Development of Burrowing Inspector Inspired in the Shoveling Movement of a Mole -3rd Report : The Method of 3-Dimensional Steering-

学 ○小林 敬 (東工大) 正 塚越 秀行 (東工大)
本田 駿輔 (東工大) 正 北川 能 (東工大)

Takashi KOBAYASHI, Tokyo Institute of Technology, t-kobayashi@cm.ctrl.titech.ac.jp
Hideyuki TSUKAGOSHI, Tokyo Institute of Technology
Shunsuke HONDA, Tokyo Institute of Technology
Ato KITAGAWA, Tokyo Institute of Technology

In this study, a new method of steering for the burrowing inspector is proposed, which is aimed to move into the soil on its own and inspect survivors more efficiently. The burrowing inspector is useful at landslide disaster sites, which occur after earthquakes, heavy rain, and accidents. The proposed propulsion method is inspired in the movement of a mole, which advances efficiently by pushing aside the soil with the shoveling motion. However, previous method of steering was not effective in some cases, and it was only for 2-dimensional steering. To solve these problems, characteristics of the steering are verified through additional basic experiments. Then, a new method of steering is proposed, and its efficiency is verified through experiments. Moreover, a method of 3-dimensional steering is proposed, which makes it possible to steer without using an additional pneumatic motor.

Key Words: Biomimetic, Rescue robot, Burrowing, Shoveling motion

1. 緒言

地震や大雨などで発生する土砂災害などで人や車両が生き埋めになる事故が後を絶たない。そこで、生き埋めとなった被災者を短時間に発見できる手段が求められている。これまでは救助隊員が土砂内に剛体棒（ゾンデ）を押し込み、その際に受ける反力から要救助者の有無を判断していた。しかし深くなるほど棒の周面抵抗が増大する、坊の先端部周辺に土塊が形成され大きな抵抗となる、などの原因により深い掘り下げ作業は困難であった。また、探査可能範囲が直線上に限定される、要救助者の判断が押し込みの感触だけでは不十分などの問題があった。

そこで本研究では、それらの課題を解決する土中探査機を提案する。すなわち、(i) 探査機自身が土を掘削しながら能動的に土中を推進し、(ii) 土中で推進方向の操舵を行ない、さらに (iii) 先端に搭載した探査装置で土中の情報収集を行うことができる探査機の開発を目指す。(図1)

Fig.1 Image of Burrowing Inspector

2. 土中推進原理

探査機が土中を推進する際、探査機先端部周辺の土が凝縮され土塊となり、探査機の推進を妨げる原因となっている。そのため土中を推進するためには探査機先端部に土塊を押しつける機能が必要である。

本研究では、土塊の押しのけだけでなく、能動的な推進機能と方向操舵機能を兼備できるかき分け動作に着目した。先端探査機はボディと2本の腕、そこにケーブルを接続した構成とし、動作は腕を前方から後方にかく掘削モードと、後方から前方に戻す復帰モードから構成される。自然界でこの動作を利用する動物としてモグラが挙げられる(図2)。また、復帰モードでの復帰方法により、かき分け動作は以下の3つに分類できる。一方向に回転し続ける無限回転方式(図3)、逆回転により復帰させる揺動方式(図4)、回転とスライドが混在する方式(図5)である。

Fig.2 Shoveling motion of a mole

Fig.3 Rotating motion type

Fig.4 Swing motion type

Fig.5 Rotating and swinging motion type

Fig.6 Burrowing inspector

Fig.7 Hinge for the swing motion type

3. 従来試作機の推進原理と課題

3.1 試作機の推進原理と構成

筆者らは効率的な推進が可能な、揺動方式を採用した試作機を作成した(図 5)。図 6 に示すように手の角度を 90 度可変にすることで、掘削モードにおいては効率的に推進しつつ、復帰モードでの後退を防ぐ。手の角度変更は、ヒンジと角度をつけた手のひらを用いた機構を用いる。これらにより、土の抵抗を受けた際に受動的に手が回転し、掘削モードと復帰モードを切り替えている。

腕の回転は各腕に 1 個ずつ、合計 2 個の空圧モータで実現し、内部に設けたエンコーダで角度信号をフィードバックしモータ角度をパルスで制御している。左右独立に駆動することで、方向操舵が可能となる。また探査機能のためにファイバースコープを搭載した。

防塵防水対策のため、伸縮性と密封性に優れた天然ゴムラテックスでドライスーツを製作し、防塵防水を実現した。

3.2 試作機による推進実験の結果と課題

土中での動作実験では平均速度約 4mm/s で深さ約 500mm の土中を、押し込み力を必要とせず能動的に推進可能である。方向操舵実験の様子を図 7 に示す。操舵を行いたい箇所では操舵方向の外側の腕のみを駆動させ、内側を停止させることによりその場で姿勢を変え、推進方向を切り替え可能であることが確認できた。

しかし、方向操舵を行う際、試作機が地面に対して垂直下向き方向へ進んでいる状態から、横向き方向へ方向操舵する動作は可能であるものの、水平横向きから垂直下向きへ戻る動作が困難であることが確かめられた。これは、土圧の高い

Fig.8 Experiment of steering motion

Fig.9 Experimental tool

方向へ進む垂直下向き方向への推進のほうが、土圧の変わらない方向へ進む水平横向き方向への推進よりも困難であるからだと考えられる。また、2 つの手のひらで土をかく構造上、方向操舵を行えるのは 2 次元平面内にとどまっている。

本研究ではこれら 2 つの課題解決を目標とし、まず 1 つ目の課題解決のため、かき分け動作の追加実験を行い、土圧の変化による進みやすさの違いを調べることにした。

4. かき分け動作実験

4.1 推進方向による影響

かき分け動作の実験を行うため、図 9 に示す試作機を用いた。中央のウォームを回転させることで 2 つの腕を同期して動かす。腕の回転面に対して手のひらを垂直に設け、腕の角度 θ を 0 度から 150 度まで回転させる。この時の腕の回転角 θ と推進距離 x の関係を地面に対し垂直下向き方向へ推進する際と、地面に対し水平横向きに推進する際にそれぞれ求めた。地面と垂直下向き方向へ進む際、掘削モードにおいて腕の回転角が 0 度から 70 度までは試作機が推進し、70 度以上では推進しなかった(図 10)。この原因として、それ以上動かしても土塊の押しのけに寄与しないこと、土圧が低い範囲をいかにも推力になりにくいことが考えられる。

一方、地面と水平方向へ進む際は、掘削モードにおいて回転角が 0 度から 20 度までは推進せず、20 度から 100 度まで大きく推進し、100 度以降はわずかに推進を続けるという結果になった(図 11)。試作機が 0 度から 20 度で推進しないのは、

Fig.10 Distance of downward movement

Fig.11 Distance of horizontal movement

Fig.12 Distance of steering motion

重力の影響がないため推進力が得られないからであると考えられる。また、70 度を超えても推進を続けたのは、水平方向に推進する際には土をかく手のひらと、土の抵抗を受ける本体部分とで土圧に差がないため、本体の受ける抵抗に対して十分な推進力が得られ、推進を続けることができたためであると考えられる。

以上より本体が大きく推進するためには、空間生成を行うこと、進みたい方向へ推進力を発生させることの 2 つを同時に行う必要がある。

4.2 方向操舵実験

次に方向操舵を行うことを想定し、2 つの腕のうちの 1 つを取り外し、片方の腕のみを動作させる。この時、(1)本体が地面と垂直下向きの状態から水平横向きへの旋回、(2)水平横向きから水平横向きへの旋回、(3)水平横向きから垂直下向きへの旋回、(4)水平横向きから垂直上向きへの旋回の 4 通りの実験を行った。一方の腕の角度 θ を 0 度から 180 度まで変化した時の腕の角度と推進距離 x 、本体の傾き角度 ϕ の関係を求め、これらを比較することにより土圧の影響を調べた。

腕の角度 θ と推進距離 x の関係を図 12 に、腕の角度 θ と本体の傾き角 ϕ の関係を図 13 に示す。図 12 より、推進の傾向は両腕を動かした時と変わらなかったが、推進距離はどの場

Fig.13 Tilt of steering motion

Fig.14 Mechanism of new steering motion

Fig.15 Distance and tilt of new steering motion

合も半分以下になった。また、図 13 より、本体の傾きは(1)の垂直方向から水平方向へ旋回する場合に比べると、(2)、(4)の場合で半分ほどになり、(3)の水平方向から垂直下向きへの旋回では 6 分の 1 程度になっている。この結果からも土圧の高くなる方向へ進む(3)の場合が最も旋回が困難であることがわかる。片方の腕をかいて方向操舵を行う場合、進みたい方向とは逆側の土をどけており、進む先の土塊を押し除けることが出来ないため、土圧の高い方向へは進むのが困難なのだと考えられる。

5. 方向操舵手法案

5.1 方向操舵案の提案

図 14 に示すように、方向操舵を行う新たな手法を提案する。探査機の腕を逆向きにかく時に腕の回転面に対し手のひらを垂直にすることで、曲がりたい方向への力の発生と空間生成を同時に行う。そして、復帰させる際には腕の回転面に対し手のひらを水平にすることで逆向きに旋回するのを防ぐ。先の試作機を用いて腕を θ が 180 度から 0 度まで逆向きにかいたとき、本体が地面と水平横向きの状態から垂直下向きに旋回する際の腕の回転角と推進距離の関係を図 15 に示す。本体は後退してしまうものの、従来の方法に比べ約 10 倍の旋回性能を示すことができた。

5.2 3次元方向操舵手法の提案

2次元方向の旋回動作に加え、3次元の方向操舵を行う手法を提案する。図16に示すように手のひらの位置をずらすことで本体がねじれる方向に偶力を発生させることができる。これにより駆動用の空圧モータを増やすことなく3次元の方向操舵が実現できると考えられる。

Fig.16 Image of 3-dimentional steering motion

6. 結言

土中探査装置のかき分け動作において、実験により推進に必要な要件を明らかにし、過去の方操舵手法の問題点を挙げた。そして方向操舵を行うための手法を提案し、その有効性を実験により確かめた。さらに3次元方向への方向操舵手法を提案した。今後はこれらの動作を実現する試作機を設計し、3次元任意方向へ自在に方向操舵することでより実用的な探査を目指す。

文 献

- [1] 塚越秀行、小山輝憲、北川 能：“人命探査を目指した土内推進ホースの開発（挿入抵抗の軽減と方向操舵の検討）”、日本機械学会論文集（C編） 71巻, 704号, 1334-1341
- [2] 水野昇幸、吉田和哉：“月・惑星掘削探査ロボットのプロトタイプ開発”、計測自動制御学会東北支部 第199回研究集会(2001.12.15) 資料番号 199-3
- [3] 永岡健司、久保田孝、大槻真嗣、田中智：“二重反転スクリュ掘進機構の実験的研究”、日本機械学会論文集（C編） 75巻, 756号, 2295-2300 (2009-8)
- [4] 安田進、小松敬治：“反力トルクを用いたレゴリス掘削機構の検討”、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08、2P2-A20
- [5] 村上太郎、大森隼人、矢田剛之、中村太郎：“蠕動運動機構を併用した月地中探査ロボットの掘削機構の検討”、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'09、1A2-F15
- [6] 長井弘明、大森隼人、村上太郎、中村太郎：“蠕動運動型掘削ロボットの開発”、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10、1A2-B20
- [7] 動物の生態図鑑、学研。
- [8] 土質工学をかじるー建設技術者としての常識としての土質力学 平井利一 2001