

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760211

研究課題名(和文) 完全機密な外皮を持つ柔軟変形移動体の研究

研究課題名(英文) Study of the high strength retractable skin and the closed type crawler vehicle

研究代表者

青木 岳史 (Aoki, Takeshi)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20397045

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、完全気密型で、災害救助現場などの劣悪な不整地環境での移動に特化した柔軟変形移動体の開発を行うものである。柔軟変形移動体は、伸縮性を持ち柔軟に変形可能な高強度繊維からなる柔軟変形外皮によって完全気密にした移動体であり、柔軟変形外皮を連続的に変形させながら移動を行う。本研究ではクローラ型移動体SCVの開発を行い、折紙理論を導入した柔軟変形外皮をクローラベルトに適用させて実機の試作を行った。また動作実験によりSCVの移動性能の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, I considered retractable materials and proposed new composite structure for making the high strength retractable skin and developed the prototypes of it for water and dust proof function of mobile robots. And the closed type crawler vehicle whose name is Slug crawler vehicle: SCV and composed of the special crawler belt using the retractable skin was developed and its effectiveness was verified by basic experiments. The crawler belts which newly introduced origami theory were designed and the SCV II was equipped them and performance tests were carried out.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：ロボット工学 移動機械 レスキュー工学

### 1. 研究開始当初の背景

柔軟変形移動体は、柔軟に変形する柔軟変形外皮により全体を保護された状態において連続的に変形を繰り返し、地面との間に滑りを発生させながら移動するのではなく、接地点を順に変えながら摩擦損失を発生させることなく移動を実現する移動体である。この概念の適用事例として接地点を無限軌道上で順に変えていくクローラベルトによる移動方式に着目し、柔軟変形外皮をクローラベルトとして用いた完全気密型クローラ車両「Slug crawler vehicle : SCV」の研究開発を継続している。柔軟変形外皮をクローラベルトに適用するためには、柔軟に変形するための伸縮性と、鉄筋等が剥き出しになっている瓦礫上の移動も可能とするための耐摩耗性能や耐突刺性能が必要不可欠である。これまでに開発されてきた既存材料ではこれらの性能を両立した物は無く、伸縮性能のみに関しては天然ゴムが優れているが耐突刺性能が非常に悪く、また耐摩耗性能や耐突刺性能に関しては防弾チョッキ等に使用されるアラミド繊維が適しているが伸縮性に乏しいため、両方の性能を併せ持つ材料はまだ開発されていない。そこで本研究では新たに複合材料からなる柔軟変形外皮を考案し、試作を行った。この複合材料は3層で構成し、表面の第1層は耐摩耗性能と耐突刺性能に優れた繊維層、第2層は繊維層にラミネートして気密性能を発揮するゴム層、第3層は伸縮性能を実現するために井桁状に縫い付けられた平ゴムであり、平ゴムが収縮することにより表面の2層が規則正しく折り曲げられて材料全体が収縮する。これにより収縮性能と生地の強靭さを分離して扱うことができ、選択できる材料の種類を大幅に増やす事ができるので用途に合わせた最適な組合せを作り出す事ができる。この柔軟変形外皮を用いると機構全体を外からカバーして完全気密とし、機械的な摺動抵抗が発生してしまう既存のオイルシールを用いた方式とは異なる防塵防水方式が実現できる。将来的には遙かに少ない出力損失特性を活かし、様々なロボットの駆動部分の高性能カバーとしての応用も期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究ではこれまでに柔軟変形外皮の原理試作と、それを適応した柔軟変形移動体であるSCV-Iの試作を行ってきた。しかし試作した柔軟変形外皮を用いた機能の実現は証明できたが、アラミド繊維等の高強度繊維を用いた試作は予算的に難しいため実現できていない。また試作したSCV-Iは動作確認が主目的であったため、実環境の不整地を走行するために必要な性能が不足しているという問題があった。さらに小型モデルであったため、内部にセンサ類を搭載するスペースが無い場合、実環境の不整地を走行するために必要な制御系のシステム構築までには至って

いない。そこで本研究では、折紙理論を用いた外皮の設計と高強度繊維を用いた柔軟変形外皮の試作を行い、SCVの移動性能を向上させるための内部機構の再設計を行う。さらに特殊な機体形状により発生する死角を最小とする複数の外界センサの検討と実装を目標とする。

### 3. 研究の方法

(1) これまでに試作した柔軟変形外皮は、縦横一様に整列されたしわを作り収縮するように設計した。しかしこの柔軟変形外皮をSCVのひし形形状のクローラベルトに適用した場合には、現状の物が最適であるとは言えなかった。クローラベルトの収縮率を解析によって求めた結果から、横両端のクローラベルトと中央プーリとの取り付け部では40%まで収縮させる必要があり、形成するしわの大きさが一様にならないことが分かった。また柔軟に変形するクローラベルトに駆動力を確実に伝えるために、SCVのクローラベルトには中央に収縮を抑制したトラクションベルトを配置している。このトラクションベルトによって地面と接触する円弧を形成し、SCVは旋回移動を可能としている。このトラクションベルトを基準として各部の収縮率を見直し、実装可能な形状でかつ収縮率を抑えたクローラベルトの試作を行う。また旋回動作中にトラクションベルトがベルトガイドから滑落しないよう形状の見直しも行う。

(2) 折紙は山折と谷折の組み合わせによって複雑な立体造形を可能としている。特定の2点間の距離を短縮することが可能であり、同時にその際に使用した折線の全長は変化しないという特徴を持つ。そこで折紙理論をSCVのクローラベルトの設計に導入し、変形効率の良い収縮形状を3次元シミュレーションから求める。またトラクションベルトから両側の受動プーリへ伝播するクローラベルトの駆動力の力線を考慮し、常にこの力線と折線が一致するように変形させると接地する地面へ効率の良い駆動力の伝達が可能となる。折紙理論の導入から求めたクローラベルトの3次元形状を設計に反映させる。

(3) これまでに、SCV-Iの試作機を用いた動作実験より斜面の登坂や横断など連続した地形での移動性能を実証することができたが、現状ではランダムなステップ状の障害物で構成する地形の走行は困難であった。そこで新たに進行方向前の駆動プーリを支える操舵用アームに縦方向の自由度を追加し、駆動プーリを持ち上げることによって段差を踏破できる内部機構の設計と試作を行う。しかしこの動作を実現するためには、クローラベルト中央部の周長の変化への対応と、機体全体の接地状態の把握と姿勢変化への対応が必要となるため、併せて検討を行う。

(4) SCVはクローラ型移動車両としてはモノトラックの形状を取るため、不整地走行に関してはスタックしないというメリットが

ある．しかし同時に中央部にクローラベルトがあるためにセンサ類は機体の左右両端のドームカバー内に設置する必要がある．そのため、前後の死角を最小とするためのセンサの選定と配置方法の検討と実装を行う．ドームカバー自体は中央プーリと締結してあるため回転してしまうが軸は回転しないので、外界センサとして測域センサと魚眼レンズを備えた小型カメラを左右両側の軸端に配置する．併せてSCVの移動特性に合ったセンサ類の配置についても検証し、実証実験より評価を行う．

#### 4. 研究成果

(1) 駆動力の伝達と回転時の負荷を考慮した柔軟変形外皮の構造として円錐殻折り[1]を採用した．円錐殻折りとは円錐状の展開圧縮可能な折り紙理論の一つで、三角形の集合で円錐状の形が構成され平坦に折りたたむことが可能である(図1)．本研究で円錐殻折りを採用した理由としては、円錐殻折りの基本形状が円錐なので外皮を左右で分割した時に収縮させることなくそのままの形で使用でき、かつ折線により変形させる事によって柔軟変形外皮の変形を制御する事ができる．また円錐殻折りの折線はらせん状に中央のトラクションベルトから両端の受動プーリまで一直線につながることができるため、駆動プーリの駆動力を受動プーリまで効率良く伝達する事ができる．しかし後進時にはこの効果は期待できないため、前進のみの走行を前提として動作の検討を行う必要がある．

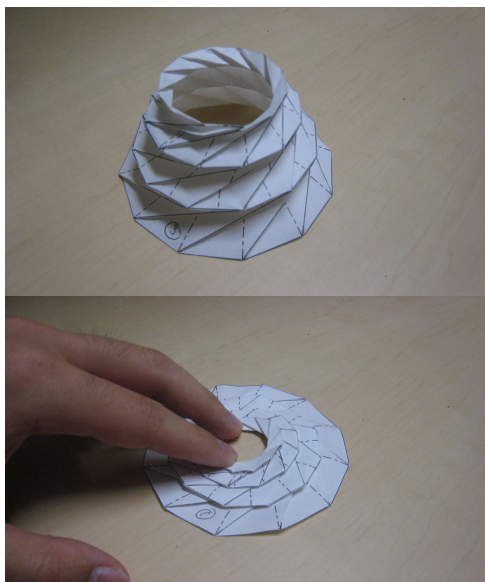


図1 円錐殻折りによる収縮

円錐殻折りでは構成する四角形の傾きによって伸縮量が決定され、この四角形の形状は全て相似であるため、1つの四角形の傾きを決定すれば全ての形状が決定する．外皮の設計は内部機構の寸法を元に行い、トラクションベルトの周長と受動プーリまでの距離

を、回転時の駆動プーリの揺動角を30度とした時に必要な伸縮率を25[%]を基に設定した．円錐殻折りを構成する四角形の段数は、数が多いほど伸縮時の外径と内径の差を小さくすることができるが、製作できる大きさには限界があるため、今回は4段とした．柔軟変形外皮の設計仕様は、外径：480[mm]、内径：195[mm]、角数：12角形、段数：4段として四角形の傾きを変えた4種類の設計を行い、シミュレーションによって最適な物を採用した．図2は今回試作した柔軟変形外皮の展開図である．この設計を基に図3に示す柔軟変形外皮で構成するクローラベルトを試作した．ゴムの性質上、ゴムへ折り紙のように折線をつける事は困難であるが、薄いゴム布に厚いゴム布を接着した2層構造を考案し、隙間を開けて厚いゴム布同士を配置する事により硬度の違いによる折線の誘発を実現した．

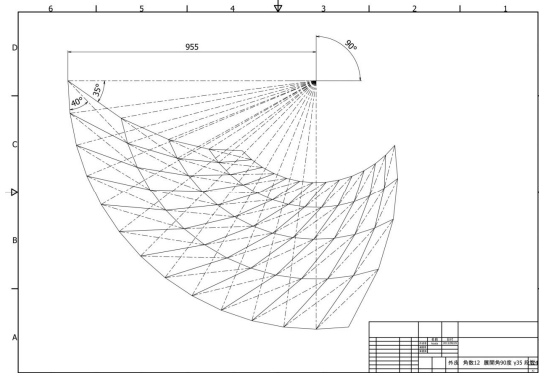


図2 試作したクローラベルトの展開図



図3 試作したクローラベルト

また設計初期ではアラミド繊維やケブラー繊維を用いた外皮の試作を検討したが、柔軟性が著しく欠けるため、今回は耐摩耗性と

柔軟性、耐候性を考慮してナイロン布にクロロプレンゴムを貼り合わせたゴム布を採用した。中央の接続部には両端にマジックテープを縫いつけ、結合面をブチルテープによって防水処理する構造とした。さらにトラクションベルトの滑落を防ぐために円筒状のフックを追加した。溝を深くし、かつ両側からガイドローラではさむ構造とすることにより把持能力を向上させた。円筒状のフックは直径 13[mm]、長さ 25[mm]のものを 5 [mm]間隔で配置し、駆動プリー上で円弧に倣い曲げる事が可能な構造とした。

(2) 不整地走破能力の向上と機能を拡張させるために内部機体の再設計を行った。SCV-I では内部機体の上下に 2 組ずつ計 4 組のガイドローラが配置されていたが、連続的な旋回動作の際にトラクションベルトが滑落してしまったため、旋回動作のための揺動機構の前後にガイドローラを 1 組ずつ追加して計 8 個とした。また SCV-II では不整地走破能力を向上させるために、機体前方の駆動プリーの直径と同程度の段差乗り越えを可能とするために本体と駆動プリーを繋ぐアーム部分へ新たに駆動軸を設け、駆動プリーを持ち上げる屈曲機構を追加した。これにより機体の大型化の効果と相まって、高さ 200[mm]までの段差の踏破が可能となった。しかしトラクションベルトは伸縮しないため、屈曲機構を追加すると屈曲時にベルトの周長が変化してしまう問題が発生する。そこで今回は先端の屈曲角度を 60 度までに制限し、その範囲内で周長が変わらないように固定式のテンシヨナを追加する設計を行った。SCV-I の機体内部にはセンサやカメラ、制御基板などを載せるスペースがなく積載するバッテリーも小さいものに限られていたが、SCV-II では機体の大型化を行い内部容積の確保を行った。その結果として内部容積を 6 倍に拡張する事ができ、センサ類や大容量のバッテリーを積載する事が可能となった。図 4 は再設計をした SCV-II の内部機体である。図 5 は試作した SCV-II の概観と機体の断面である。また表 1 に SCV-II の仕様を示す。本研究では制御用コントローラとして Raspberry Pi を採用し、外界を視認するセンサとしてカメラモジュールの実装までを行った。

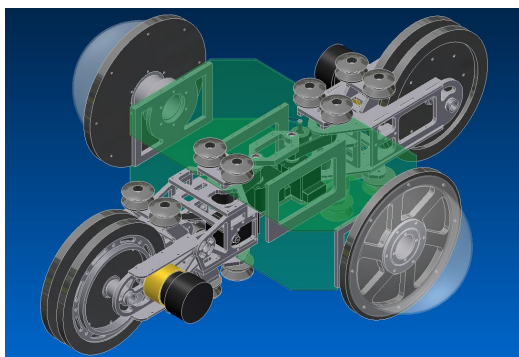


図 4 再設計した SCV-II の内部機構

表 1 SCV-II 仕様

Length	650[mm]
Width	450[mm]
Height	200[mm]
Mass	5800[g]
Driving Wheel diameter	160[mm]
Passive Wheel diameter	180[mm]



図 5 SCV-II の概観と機体断面

(3) 試作した実機を用いて、製作した柔軟変形外皮の有用性と内部機体の改良による効果を確認するために動作実験を行った。図 6 に動作実験の様子を示す。動作実験より、駆動プリーによって柔軟変形外皮を回転させて直進動作が行える事を確認した。また旋回動作を行うための左右への揺動機構と、先端を持ち上げる屈曲機構の動作を確認することができたが、旋回動作を行うためにトラクションベルトで円弧を形成した際に、柔軟変形外皮の中央部のマジックテープが剥がれてしまい、走行が困難になってしまった。円錐殻折りで構成する柔軟変形外皮は、円錐形を前後に広げる事によって底面を楕円形に変形させているため、外皮を回転させた際に円錐角折りの折線が歪み、駆動時の負荷となってしまう事が分った。段差乗り越え実験では、高さ 200mm の段差へのアプローチが可能であったが、先端の駆動プリーが乗り上げた際に機体左右の受動輪が浮いてしまい、機体が不安定になることが確認できた。今後は柔軟変形外皮の折り方と接続部の再検討、内部機体の機構構成の検討が必要である。

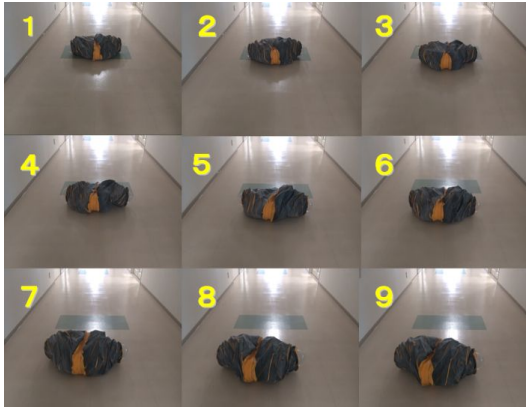


図6 SCV-IIの走行実験

#### 参考文献

[1]野島 武敏, 折りたたみ可能な円錐殻の創製, 日本機械学会論文集. C 編 66(647), pp. 2463-2469, 2000

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計1件)

佐藤滉太, 青木岳史: "完全気密なクローラベルトを持つ柔軟変形移動体の開発 -折紙理論を用いたクローラベルトの設計-", 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2A2-D07, 2014年5月27日, 富山国際会議場

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

青木 岳史 (AOKI TAKESHI)

千葉工業大学 工学部 未来ロボティクス学科

研究者番号: 20397045