

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 8 月 30 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05892

研究課題名(和文) 空気レス・インテリジェンスタイヤの開発と低スリップ走行アルゴリズムの構築

研究課題名(英文) Development on Airless tire with intelligence functions and Construction of Traveling Algorithm to keep low slip behavior

研究代表者

飯塚 浩二郎 (Iizuka, Kojiro)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：10453672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：災害地では、瓦礫等による救助車両等のタイヤにパンクが発生し、砂や泥などの地盤ではタイヤがスリップ・沈下しスタックが起きる。これにより、救助活動へ様々な障害が発生する。本研究グループでは災害地における走行の問題を解決するために「硬い」、「柔らかい」両方の特性を持つ空気レスタイヤを開発し、走行試験にてその有効性を確認する。また、軟弱地盤と剛体面の走行面を判別するためのセンシングおよびシステムを構築し、実際にタイヤが走行する際の表面にかかる垂直応力を測定する。これらの得られたデータから可変剛性アルゴリズムを検証する。

研究成果の概要(英文)：The vehicle on disaster areas has risks of the puncture at traversing the ground with debris, and is easy to stack at traversing loose soil. The special tire, therefore, are required to overcome these tasks. On our research's group, the variable rigidity wheel which can be kept airless condition is developed to solve these tasks. And then, we aim to construct the sensing system to the proposed tire. To grasp the normal stress at traversing is very important to judge ground situation. Therefore, the sensing system to measure the normal stress is constructed. From these measurement results, we will design algorithm for the proposed tire with high locomotion ability.

研究分野：ロボット工学, 機械設計, 農業工学

キーワード：空気レスタイヤ 軟弱地盤 可変剛性

### 1. 研究開始当初の背景

タイヤは走行地盤と車両の間に存在し、重要な駆動力を生み出し、そして車のボディに伝達させる重要な部分である。そのタイヤひとつでもバーストを起こしてしまうと車両は走行することが難しくなってしまう、本来の目的を達成させることができない。東日本大震災のような被災・天災が起きた際、一般道路やレスキュー活動（救急隊や消防隊など）に必要な道路はさまざまな瓦礫で覆われた。空気圧で保持されているタイヤの場合、こういった瓦礫上を走行すると瓦礫の先端など鋭角なものが柔らかいタイヤ表面に刺さり、バースト（空気破裂現象）を起こす。実際のレスキュー活動において、パンク現象が多々見られた。また、通常走行において、釘のようなわずかな鋭利な物体が刺さり突然パンクすることもあり人的事故に繋がるケースもある。タイヤの内部にある空気の代わりとして、空気を使わないタイヤが開発されている。これらのタイヤはパンクせずに回転運動し、有効な駆動力を引き出すものとしては成立している。申請者においても2次元繊維材料の張りを調整することで可変剛性を可能とした空気レスタイヤを開発した[2014年8月27日特許出願済み]。剛性を変化させることで、地盤との接地状態を変化させ、滑りを低減させることや軟弱な地盤（砂、雪など）に対して高い走破性を確保できる。これらの背景から、地盤情報を獲得し、走行に有効な剛性を能動的に実現させる機能・システムが望まれる。

### 2. 研究の目的

1章の背景から、本申請においては、滑りを検知できるセンサーを搭載し、自動的に可変剛性できる空気レスタイヤの開発と滑り検知情報を利用した低スリップ走行アルゴリズムの構築を目的とする。一般的に、走り出しや、緩い地盤、降雨時の地盤、瓦礫地盤では、滑り現象が顕著となる。そこで、タイヤの剛性を変化させ適切な接地状態を保持し、低剛性（柔軟状態）においてもパンク皆無の空気レスタイヤを用いて滑りセンサーと自動可変剛性ユニットで構成される画期的な空気レス・インテリジェンスタイヤを開発する。そして、この空気レス・インテリジェンスタイヤを用いて低スリップ走行を実現させる走行アルゴリズムを構築する。

### 3. 研究の方法

#### 3-1. 可変剛性タイヤ機構の検討

車両の重量に対応する空気レス可変剛性タイヤを開発するため、圧縮バネの基本特性に着目する。圧縮バネは、変位量を大きくするほど圧縮するのに大きな力が必要と

なる。小さい変位量であれば小さな圧縮力、大きい変位量であれば大きな圧縮力が必要であるということになる。そこで、バネの変位量をコントロールすることにより可変剛性を実現する機構を提案する。図1-2に提案する可変剛性機構の概略図を示す。提案する可変剛性機構は、柔らかい状態(図1)をデフォルトとし、その状態から硬くする方法(図2)をとる。ブロック上部が走行面に接すると想定し、上部からの負荷に対して可変剛性を実現する機構とした。この機構の特徴は、バネを内側から圧縮する点である。これにより、接地面から受けた負荷によるブロックの変位量を変更することが可能となる。

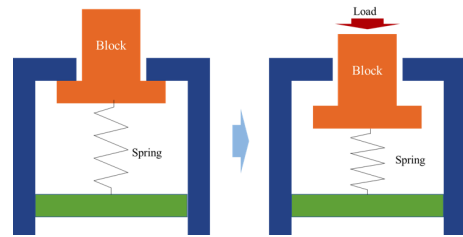


図1 可変剛性機能(ソフトモード)

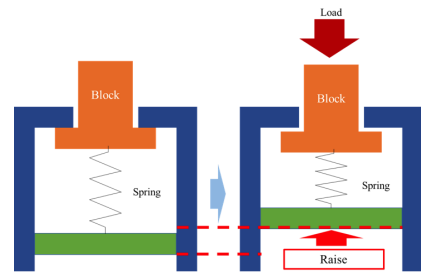
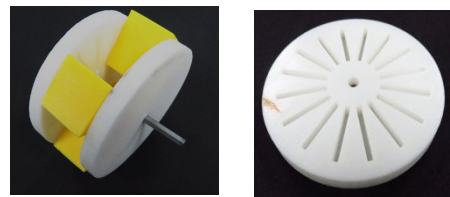


図2 可変剛性機能(ハードモード)

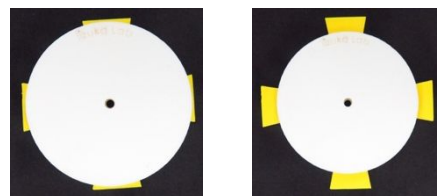
#### 3-2. 空気レス可変剛性タイヤの開発

この機構を採用するにはタイヤ内部に十分なスペースの確保が必要となる。しかし、押し上げ機構はタイヤの最も内側に配置さ



(a) 進展機構 (b) 直動ガイド

図3 可変剛性を実現させる伸展機構



(a) 初期状態 (b) 展開状態

図4 伸展機構の動作の様子

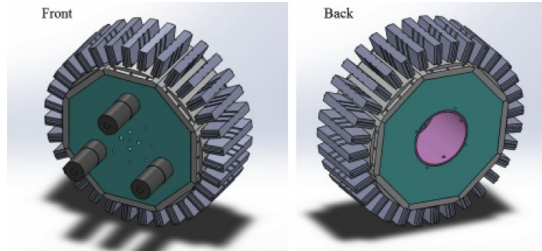


図5 可変剛性タイヤ

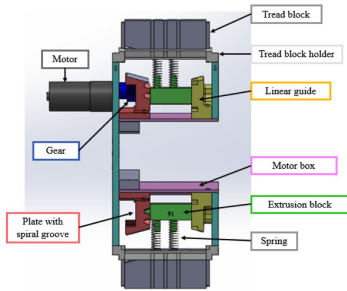


図6 提案可変剛性タイヤの内部構造

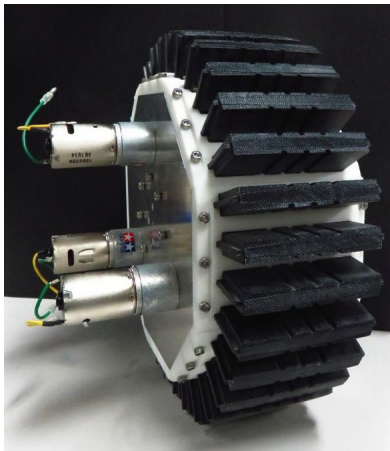


図7 提案可変剛性タイヤ

れるため、スペースの確保が難しい。新たな押し出し機構には、ブロック、パネ、押し出し機構が常に一直線になるようにする必要がある。この機構を実現させた提案を図 3a に示す。これは回転運動を直動運動に変換する機構であり、直動ガイド、押し上げブロック(図 3b)、渦状の溝を切ったプレートの 3 種類の部品から構成されている。図 4 に機構の動きを示す。渦プレートを時計回りに回転させると、押し上げブロックが内側から徐々に外側に出てくる様子を確認できる。逆に渦プレートを反時計回りに回転させれば、押し上げブロックを内側に移動させることが可能となっている。

上記の簡易試作した機構について、本格的にタイヤに発展させたもの(CAD 図)を図 5 に示す。可変剛性を自動で行うため、渦プレートの回転用にモータ、及び歯車を取り付けている。タイヤ内部の構造を図 6 に示す。トレッドブロック、パネ、押し上げブロックの位置関係を常に一直線状にする

ことを可能とした。実際に製作した可変剛性タイヤを図 7 に示す。

### 3-3. 空気レス可変剛性タイヤのセンシング化について

開発した可変剛性タイヤのトレッドブロック部分に触覚センサを搭載し、タイヤと接地面との接触情報(法線応力)を獲得するシステムを構築する。トレッドブロックにセンサを搭載した概要図を図 8 に示す。また実際に搭載しているセンシングトレッドブロックを図 9 に示す。このセンシングブロックのキャリブレーションを行い、図 10 に示すように出力電圧と垂直応力の関係から、センシング可能なデバイスとした。

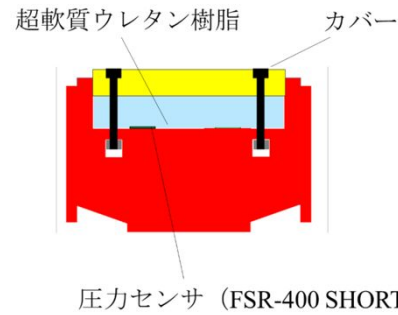


図8 トレッドブロックのセンシング化

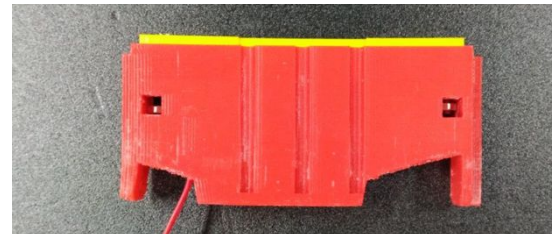


図9 センシングトレッドブロック

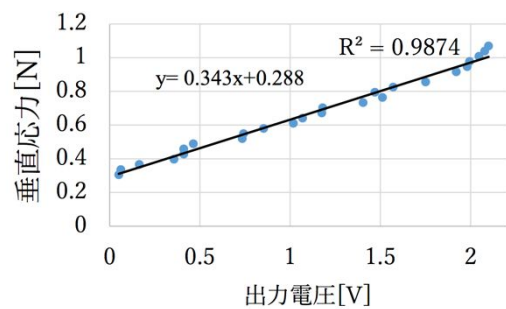


図10 出力電圧と垂直応力の関係

### 3-4. システムについて

前節に述べたセンシングブロックを用いた測定システムについて図 11 に示す。接触情報を電圧データに変換し、増幅・フィルタリング後、マイコンにてデータ輸送を行い、メイン PC で制御およびモニターする。

### 3-5. 走行試験について

走行試験のための単輪を用いた試験装置

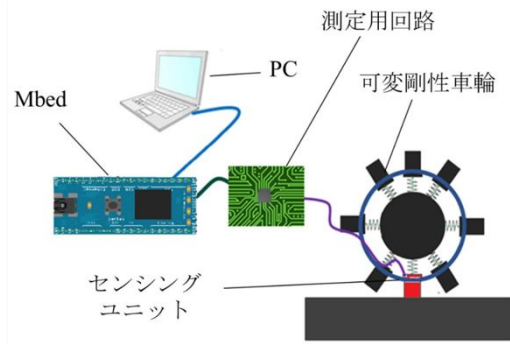


図 11 システム構成

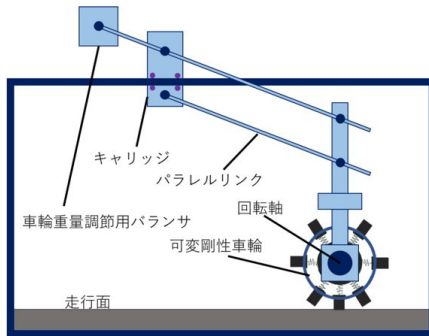
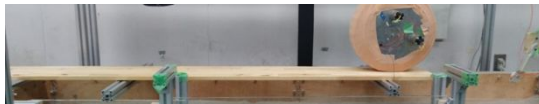


図 12 走行試験機



(a) 剛体面走行の様子



(b) 軟弱地盤上走行の様子

図 13 走行試験の様子

表 1 実験条件

走行面	斜度	速度[mm/s]	荷重[kg]
剛体面	0	30	7.5
軟弱地盤	0, 5, 10, 15		

を図 11 に示す。ガイドに取り付けられたパラレルリンク機構と直接地盤に設置させる提案タイヤにて構成されている。バランスによりタイヤにかかる荷重は調整可能となる。また、表 1 に実験条件を示す。移動速度、荷重は一定として、走行斜度を 2 種類、斜面角度を 4 種類設定している。測定項目としては、剛体面走行では、走行抵抗を確認するため電流値測定を行い、軟弱地盤走行では、移動速度を測定しながら、スリップ率による比較を行っていく。

#### 4. 研究成果

##### 4-1 走行結果

走行試験の様子を図 13 に示す。タイヤのトレッドブロックを覆うようにキネシオテープにてトレッド代用として貼っている。図 13(a)には剛体面を、図 13(b)には軟弱地盤上を走行させている様子を示す。図 14 に剛

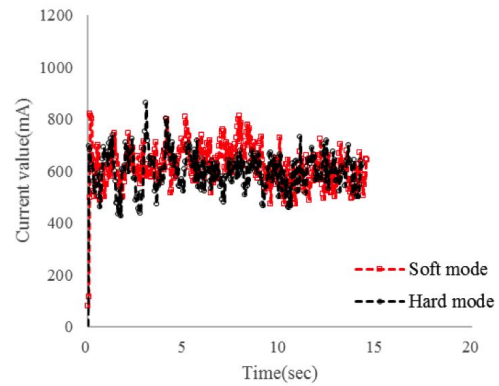


図 14 実験結果:剛体面走行の電流値

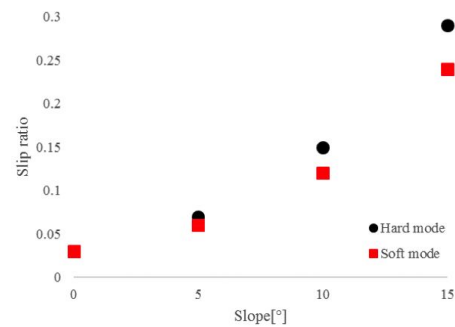


図 15 実験結果:軟弱地盤上走行のスリップ率

体面走行中の走行抵抗を見るために、電流値を測定した結果を示す。走行中の電流の値は上下に振れているのがわかる。平均電流値を見てみると、剛体モードでは、599mA、柔軟モードでは632mAであった。つまり走行性能の差がない剛体面(斜度 0 度)の場合は、タイヤを柔軟にせず、剛体モードにしたまま走行することが高い効率であるということが確認できた。

次に軟弱地盤上走行させた際のスリップ率測定の結果を図 15 に示す。これは実験から得た実際の走行速度と理論上の移動速度との比により算出している。黒丸が剛体モード、赤四角が柔軟モードのスリップ率となっている。斜度が 10-15 度に上昇していくと、柔軟モードの効果が見られるのがわかる。軟弱地盤走行の場合、斜面下方向へにかかる重力影響が大きくなればなるほど、地盤面を破壊しやすく滑りやすい状態になるが、柔軟モードにすることで、剛体モードと比べて、破壊やすべりが減少されていることがわかる。つまり、軟弱地盤上走行においては柔軟モードが有効であることを示すことができた。

##### 4-2 センシング(応力測定)

提案および製作したセンシングシステムを利用して、剛体面を走行した時のそれぞれのモードにおける法線応力の結果を図 16 に示す。青点が剛体モード、オレンジ点が柔軟モードの結果を示している。柔軟モードのほうが、剛体モードよりも低い傾向の法線応力となっているのがわかる。これは

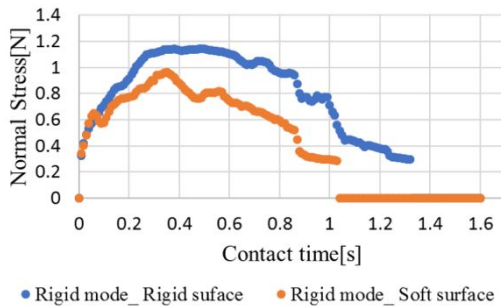


図 16 剛体面走行時の法線応力

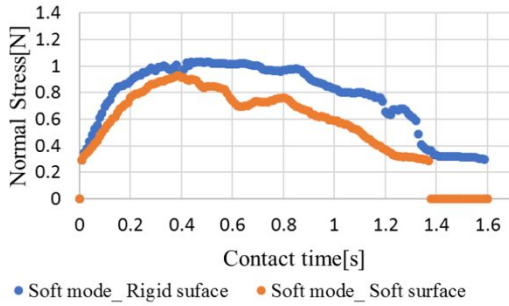


図 17 剛体面走行時の法線応力

柔軟モードにすることで、複数のトレッドブロックが地盤とあたり、荷重を分散させていることを意味する。また、図 17 に軟弱地盤走行時の法線応力を示す。剛体モードにおいては、剛体走行時に比べて値が小さくなっているのがわかる。これは軟弱地盤に沈下し、複数のトレッドブロックが接触し荷重分散していると言える。一方、柔軟モードでは、値自体は変わっていないが、接触している時間が長くなっている。これは剛体モードと同様に沈下しているため、軟弱地盤との接触時間が長いと言える。実験結果(スリップ率および法線応力)を用いてアルゴリズムの検討を行う。

#### 4-3 アルゴリズムの構築

剛体モードによる剛体面走行を基準として、アルゴリズムの構築を行なっていく。これは剛体モード - 剛体面の関係を  $V_{ref\_hard}$  (法線応力最大値),  $T_{ref\_hard}$  (法線応力分布時間) と定義して、それぞれのモードに対する関係と比較していく。提案タイヤの初期モードを剛体モードとし、剛体面走行が実施されると  $V_{ref\_hard}$ ,  $T_{ref\_hard}$  と一致、または近い値の場合は、剛体地盤として検知し、剛体モードとする。一方、柔軟モードでの軟弱地盤走行が適していることから、 $V_{ref\_hard}$  よりも値が小さく、 $T_{ref\_hard}$  と一致するような関係となった場合、軟弱地盤と判断する。この 2 つの関係を「適」とみなし、それ以外の関係を「不適」とする。「不適」の場合は、「適」となるようにモードチェンジを行なっていく。これらの考えを統合したアルゴリズムを図 18 に示す。

#### 4-4. まとめ

本研究では、可変剛性機能を用いたタイヤの実現に成功し、走行試験の実験結果からアルゴリズムの構築にいった。ただし、このアルゴリズムは事前に行われる走行試験のデータをベースとして構築する必要があり、堅牢なシステムとはならない。今後、ref を強化するための学習機能を入れて、マルチセンシングシステムと統合させ、未知環境での走行を繰り返しながら、可変剛性させるアルゴリズムを構築していく予定である。

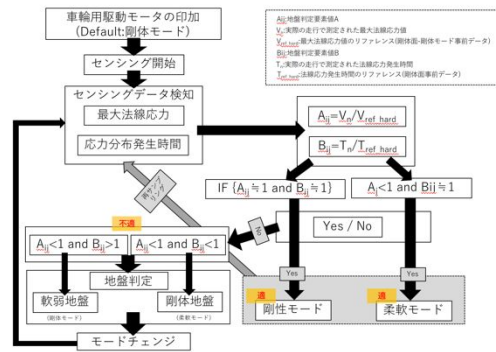


図 18 可変剛性タイヤのためのアルゴリズム

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

・飯塚浩二郎, 石井秀幸(芝浦工大), 中村貴裕(信州大), “空気レスタイヤの可変剛性機構に関する研究”, テラメカニクス研究会, vol.38, No.43-46, 2017.

・石井秀幸(芝浦工大), 中村貴裕(信州大), 渡邊智洋, 飯塚浩二郎(芝浦工大), “センシング機能を搭載した UGV 用可変剛性タイヤに関する研究”, 日本機械学会関東学生会第 57 回学生員卒業研究発表講演会, USB(1304), 2018

・石井秀幸, 飯塚浩二郎, 渡邊智洋(芝浦工大), 中村貴裕(信州大), “センシング機能を搭載した UGV 用可変剛性タイヤについての研究”, ロボティクスメカトロニクス講演会講演集, USB(2A1-C08), 2018.

[産業財産権]

出願状況 (計 1 件)

名称: 「エアレスタイヤ」(空気レス・可変剛性タイヤ)

発明者: 飯塚浩二郎, 中村貴裕

権利者: 芝浦工業大学, パーソル R&D 株式会社

番号: 特願 [2017-219898](#)

出願年月日: 平成 29 年 11 月 15 日

国内外の別: 国内

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者: 飯塚 浩二郎 (Iizuka Kojiro)  
芝浦工業大学・システム理工学部・教授  
研究者番号: 10453672