

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月10日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560252

研究課題名（和文） 不整地における装軌車両の走行制御手法の構築と自律走行手法の確立

研究課題名（英文） Construction of path tracking control method and establishment of autonomous navigation for tracked vehicles on rough terrain

研究代表者

栗栖 正充（KURISU MASAMITSU）

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：30287429

研究成果の概要（和文）：走行時に発生する履板の滑りを補償する装軌車両の走行制御手法の構築、路面からの抗力と滑りを考慮した自己位置推定手法の構築を行った。走行制御手法に関しては、路面の性質が変化する場所で若干の性能低下はあるものの、目標経路へ車両を追従させることができることをシミュレーション、及び実験により確認した。自己位置推定手法に関しては、路面の性質が変化する場所で推定精度が低下するため、センサの自動調整機能の付加等、さらなる改良が必要である。

研究成果の概要（英文）：A path tracking control method for tracked vehicles, which compensates slippage of crawlers, was constructed. A position estimation method in consideration of the slippage and drag force from a ground was also constructed. As for the tracking control, simulations and experiments show that the control method makes the vehicle possible to follow a desired path, although the tracking performance degrades on a place where characteristics of the ground change. As for the position estimation method, we found that accuracy of estimation decreased on the place where characteristics of the ground changed. Further improvement to add an automatic calibration of sensors is required.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2010年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2011年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 2012年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：知能ロボティクス・装軌車両・自己位置推定・走行制御・滑り

1. 研究開始当初の背景

(1) 安全性の確保、作業環境の改善等の観点から、土石流の土砂の撤去、砂防ダム工事等において無人化施工が導入されている。無人化施工とは遠隔地から建設機器を遠隔操作することで土木工事を行う施工技術である。

山間地における無人化施工では、現場からの土砂の搬出経路が舗装されていない山道であるため、搬出には不整地での走行性能が高いクローラダンプ(装軌車両)が使用されることが多い。現状ではこの装軌車両の操作は、山道の随所に設置された複数の監視カメラ、

および装軌車両の操縦席に設置されたカメラを見ながら、人が遠隔地から行っている。土砂の搬出作業は同じ道程の往復走行に限定された単純作業である。しかしながら、複数のカメラ映像からの情報のみで建設機器を遠隔操作することは熟練を要することから、熟練オペレータの育成が必要となる。また、建設機器の遠隔操作は極度の疲労を伴うため、短時間での交代を余儀なくされる。このことから、装軌車両による土砂の搬出作業を自動化することが望まれる。

(2) 装軌車両は履板の路面への食い込みにより接地性が高く、不整地での走破性や直進走行時の安定性は装輪車両に比べ高い。これに対して、旋回運動を伴う走行時は履板の一部を滑らせなければならず、本質的に旋回しにくい特性を持っている。また、履板の滑り方は粘度や粒度等の路面の土質によって異なり、予測も難しい。従って、旋回時には車両の運動学モデルを固定できない。これにより、従来の装輪車両で利用されている運動学モデルを用いたフィードバック制御系の構築が難しく、装軌車両の自律走行制御が困難となっている。また、山間地の経路ではGPSの電波が届かない区間もあり、安全な自律走行の実現には不整地における車両の高精度な自己位置推定が必要となる。従来の運動学モデルを用いた自己位置の推定法では、位置の推定精度が低く、安全に自律走行をさせるには不十分である。

2. 研究の目的

本研究では不整地走行用の装軌車両を自律的に移動させるための不整地における自律走行手法の確立を目的とする。このために、走行時に発生する履板の滑りを補償する走行制御手法の構築、路面からの抗力と滑りを考慮した装軌車両の自己位置推定手法の構築を目指す。

3. 研究の方法

(1) 滑りを伴う装軌車両の旋回運動は、仮想的な二輪独立駆動型車両の旋回運動と等価になる(図1)。滑り速度の情報を利用して仮想二輪独立駆動型車両のモデルを逐次算出し、そのモデルに移動ロボットの速度フィードバック則を適用すると、仮想モデルが変化しない間は、装軌車両が与えられた軌道へ漸近収束性することが保証できる。ただし、この制御手法は、目標軌道として時間に拘束された軌道を必要とする。本研究では、逆最適制御による変換手法を用いることで、仮想二輪独立駆動型モデルによる軌道追従制御手法を経路追従制御へ拡張し、目標経路へ復帰させるためのクロソイド曲線を用いた局所的経路生成手法と組み合わせることで、履板

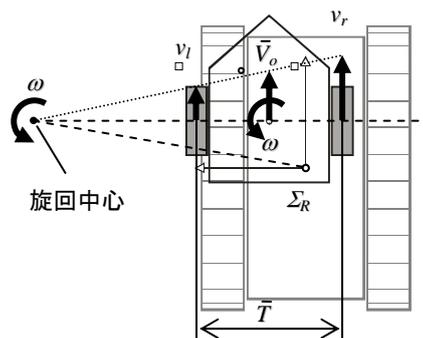


図1 仮想独立二輪型車両

の滑りを補償する装軌車両の走行制御手法を構築する。構築した制御手法はシミュレーション、ならびに実験機を用いた実験により、その有効性を検証する。なお、本制御手法は地面に対する車両の速度が既知でなければならない。履帯が地面に対して滑りを生じている場合、左右の履帯の速度から車両の速度を得ることはできない。したがって、実験において地面に対する車両の速度は、次の自己位置推定により同時に推定した推定値を用いる。

(2) 装軌車両の自己位置推定では、路面からの抗力や滑りを取り込むために、加速度を考慮した3次元動力学モデルを基に車両の運動方程式を構成し、拡張カルマンフィルタによって車両の状態を推定する。

履板接地面の抗力分布は左右それぞれ図2の様に線形近似する。また、車両の角加速度は加速度センサを複数用いることで求める。これにより、摩擦力を含めた路面からの抗力、重力、車両の動特性等を考慮した動学的拘束が導出できる。また、ジャイロセンサより得られる車両の角速度、エンコーダより得られる履帯の速度、地面に対する車両の滑り速度より運動学的拘束が導出できる。これら動学的拘束、運動学的拘束に、テラメカニクス分野で提案されている接地面からの抗力と滑りとの関係式を加えることで非線形状態方程式が得られる。ただし、車両の姿勢

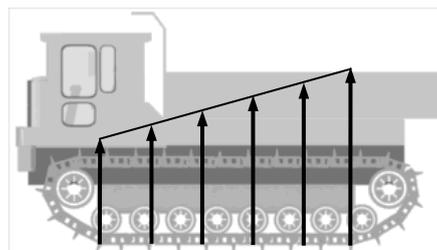


図2 抗力の線形近似

表現にはクオータニオンを用いる。なお、抗力と滑りとの関係式には、路面の性質を表す土質パラメータが含まれるため、本研究では土質パラメータも推定対象とし、これを状態量に含める。エンコーダより得られる履帯速度、ジャイロセンサ、および加速度センサの信号を観測量とした観測方程式と上記状態方程式から、拡張カルマンフィルタを構成することで、装軌車両の自己位置推定手法を構築する。

構築した手法は装軌車両型小型実験機へ実装し、実験機を用いた実験により有効性を検証する。なお、推定精度の評価は、RTK-GPSによる実測値と推定値とを比較して行う。

4. 研究成果

(1) シミュレーションによる検証

シミュレーションにより構築した走行制御手法の検証を行った。なお、シミュレーションはMATLABを用いて行った。目標経路は直線経路と円弧経路を組み合わせて構成している。また、シミュレーションにおいては $4 \leq x \leq 6$, $0 \leq y \leq 2$ の領域の地面を泥炭層、その他の領域を砂礫層として土質パラメータを設定した。車両の自己位置については真値が取得出来るものとしている。

結果の一例を図3に示す。図3より、土質パラメータが変化していない路面では、目標経路に対して追従性が良好であることがわかる。反面、土質パラメータが変化する場所で経路への追従性能が低下していることが確認できる。しかしながら、路面の土質パラメータが一定の区間において目標経路へ復帰している。土質パラメータが常に大きく変化し続ける路面はないことから、構築した走行制御手法は、車両の位置が正確に取得できている限り、車両を目標経路へ追従させることができる。

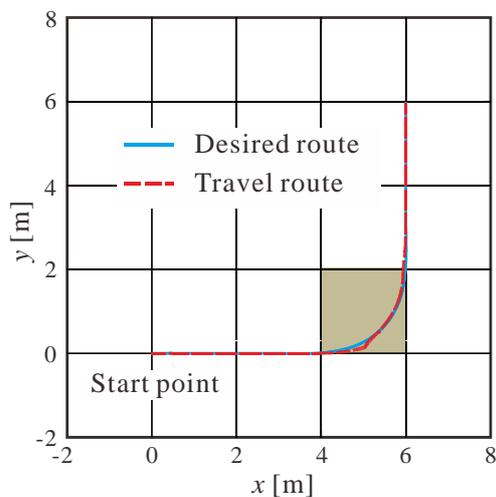


図3 シミュレーション結果

(2) 実験機を用いた検証

装軌車両型実験機を用い、構築した自己位置推定手法、ならびに走行制御手法による走行制御実験を行った。実験機は、車体長0.86m、車体幅0.42m、履帯接地長0.55m、履帯幅0.08m、履帯間距離0.34mである。また、三軸加速度センサ5個、一軸ジャイロセンサ3個を搭載した(図4)。走行時の実験機の実際の位置は、実験機に搭載したRTK-GPS受信機により取得し、推定位置と比較する(図5)。目標経路はシミュレーションで設定した経路と同じ経路を使用した。また、砂礫と土砂によりシミュレーションに近似した路面を模擬した(図6)。

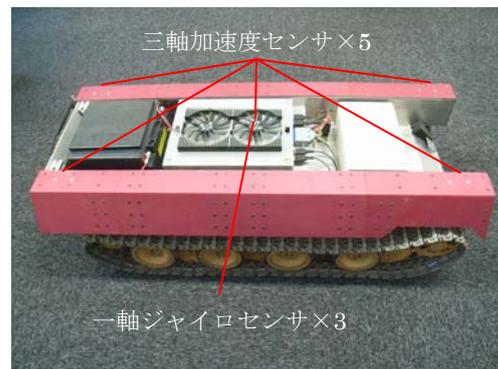


図4 装軌車両型小型実験機

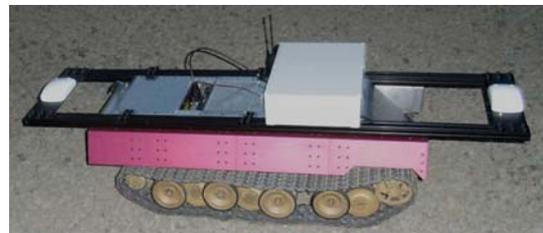


図5 RTK-GPS受信機を搭載した実験機



図6 実験環境

実験結果の一例を図7に示す。実験により、土質パラメータがあまり変化していない路面では、推定位置から算出される経路に対して追従性が概ね良好であることが確認できた。土質パラメータが大きく変化していると思われる場所では、シミュレーション同様経路への追従性能が低下しているが、その後目標経路へ復帰していることから、構築した走

行制御手法は、実環境においても有効であるといえる。なお、追従性能をさらに向上させるためには、土質パラメータの推定値を反映する制御ゲイン調整器の構築が必要である。

一方、推定位置に関しては、土質パラメータがあまり変化していない路面では良好な推定値が得られることが確認できたが、土質パラメータが大きく変化している場所では推定誤差が大きくなっている。これは車体の角加速度の推定誤差に起因するものと考えられる。土質パラメータの変化が大きい場所では履板の滑りが大きくなり、車体に発生する角加速度も大きくなる。構築した自己位置推定手法は車両の推定角加速度も利用するが、角加速度の推定は複数の加速度センサの取り付け誤差の影響を大きく受ける。このことから、加速度センサの取り付け精度が自己位置推定の精度に大きく関わることがわかった。したがって、センサの取り付け誤差をキャリブレーションする機能を自己位置推定に内包する必要がある、この点は今後の課題として残る。ただし、本研究の自己位置推定手法では、GPS の情報を利用しておらず、単独では推定精度に関して十分ではないが、GPS を利用できる地点で GPS の情報による補正を行うことで、走行制御に必要な情報を取得することは可能である。GPS が利用できる環境であれば、走行制御手法は有用であることから、今後は実機での検証を行うことで走行制御手法の実用化を検討する。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗栖 正充 (KURISU MASAMITSU)

東京電機大学・工学部・教授

研究者番号：30287429

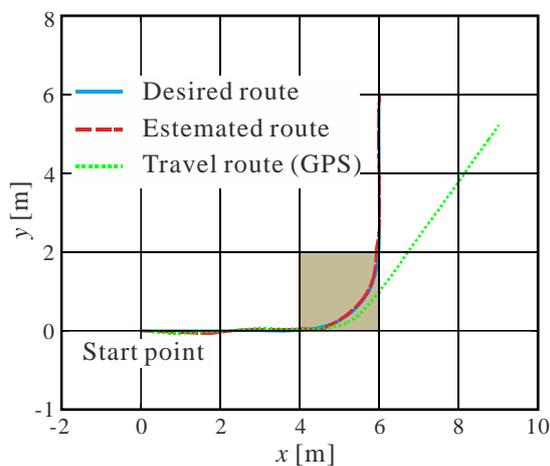


図 7 実験結果

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)

なし