地雷探知のための低接地圧車両に関する研究*
(低接地圧タイヤ特性を考慮した車両位置・姿勢制御方法の提案)福田 敏 男^{*1}, 佐 藤 慎 祐^{*2}, 長谷川 泰久^{*3}
松 野 隆 幸^{*4}, Zakarya ZYADA^{*5}Low-Ground-Pressure Vehicle for Landmine Detection
(Characteristic of Low-Ground-Pressure Tire and Proposal
of Position and Posture Control Technique)Toshio FUKUDA^{*6}, Shinsuke SATO, Yasuhisa HASEGAWA,
Takayuki MATSUNO and Zakarya ZYADA^{*6} Micro-Nano System Engineering, Nagoya University,
1 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

This paper proposes a kinematic model of the vehicle with low-ground-pressure tire that enables to enter a minefield in order to scan remaining landmines by a ground penetrating radar in level III survey. The low-ground-pressure tire makes low-pressure contact with a ground by deforming its shape of the tire, but the deformation deteriorates position and steering control accuracy. Therefore this paper models the kinematics of the low-ground-pressure vehicle based on experimental results. Besides we experimentally confirmed that the vehicle could precisely trace the target trajectory by considering its kinematics in simulated minefield.

Key Words: Moving Robot, Positioning, Motion Control, Landmine Detection, Vehicle

1. 緒 言

現在, 世界には 5000 万個から 1 億個の埋設地雷が未処理で放置されているといわれており, 重大な社会問題になっている。現時点では探針や金属探知機を用いた人の手による除去が一般的である。しかし, その除去作業によって作業者自身が被害にあうことも少なくない。そこで人に代わるものとしてロボットによる地雷除去への期待が高まっている。我々は地雷の探知作業に絞って, ロボットによる地雷探知のための技術を開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

これまで数々の地雷探査ロボットが研究されてきたが, その多くは地雷を回避しながら地雷原を移動するものであった⁽³⁾⁽⁴⁾。そのためには複雑な機構システムや多額のコストが必要になる。しかし, 実際の現地で必要とされるシステムは, 現地の人でも使用でき, さらに修理することも出来る簡単なシステムであり, また多額のコストをかけることも出来ない。そこで, 我々は地雷原に直接侵入し, たとえ地雷の上をタイヤが通過しても地雷を起爆させることなく地雷探知作業を行

うことができる低接地圧タイヤを用いた車両を提案してきた⁽²⁾。この車両は市販のレジャー用カートを改造して製作しており, 安価で車輪型なので機構システムも複雑ではない。しかし, 実際に車両を制御する際にタイヤが大きく変形するために, 横滑りが大きくなり, その点を考慮した制御をする必要がある。そこで, 本論文ではこれまでに提案してきた低接地圧タイヤを用いた地雷探査車両の制御方法を提案するとともに, 低接地圧タイヤによる接地圧の低減の効果についても検証する。

2. 地雷探知システム

2.1 システム構成 初めに, 低接地圧地雷探査車両を用いた地雷探知システムについて説明する。車両は地雷原内で作業を行うが, 地雷原から離れた安全な場所に車両のモニタリングおよび操作を行う固定局を設置し, 作業者はこの固定局から操作する(図1)。固定局には自動追尾トータルステーション(反射プリズムを自動追尾しながらプリズムと本体との間の相対座標を計測する機器)を設置し, 車両に装備した反射プリズムとの相対座標を計測する。固定局側の PC と車両に搭載したノート PC は無線 LAN によって通信を行い, 固定局側の PC から一定周期で相対座標を車両に送信する(図2)。

* 原稿受付 2007 年 7 月 6 日。

^{*1} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻(☎ 464-8603 名古屋市千種区不老町 1)。^{*2} 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻。^{*3} 正員, 筑波大学大学院システム情報工学研究科(☎ 305-8573 つくば市天王台 1-1-1)。^{*4} 正員, 富山県立大学工学部知能デザイン工学科。^{*5} 名古屋大学大学院工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻。

E-mail: fukuda@mein.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 System appearance

Fig. 2 Detecting system

2.2 低接地圧地雷探査車両 図3に示す地雷探査車両は市販のレジヤ用カートのフレームを用い製作した。このシステム構成は、図2に示すように、車両には、自立走行を行うための制御器、通信機器及びバッテリーが搭載され、また、地雷探知センサとして地中レーダ (Ground Penetrating Radar: GPR) を搭載している。我々が使用した地中レーダは、3つのアンテナエレメントを有し、1計測点で3つの送受信偏波角での計測を行う。これにより、取得された計測信号に散乱行列処理を加えることで、任意の送受信偏波角での計測信号を求めることが可能となる⁽¹⁾⁽⁵⁾。この地中レーダのセンサヘッドを、車両前部に取り付けた4軸 (縦軸、横軸、回転2軸) マニピュレータによって地表面に倣うように走査し、一定間隔ごとに計測を行う。また車両の姿勢を計測する方位・傾斜計を搭載し、車両およびマニピュレータの制御用と地中レーダ信号処理用に合計2つのノートPCが搭載されている。

Fig. 3 Overview of low-ground-pressure vehicle

3. 低接地圧タイヤ

地雷原に直接侵入して地雷探査を行うには、低接地圧タイヤを使うことでたとえ地雷を踏んでも地雷を起爆させないことが重要である。本章では実際に低接地圧タイヤによる接地圧低減の効果を検証する。低接地圧タイヤとして Roleez Wheels, Inc. 製の低接地圧タイヤを使用し、その材質はポリウレタン製のため内部の空気圧を調節することで柔軟に地面との接触面積を大きくし、接触圧力を低減することが可能である。

今回、地雷として一般的な PMN2, TYPE72, PMN の3種類を想定し、それらの起爆平均面圧を表1に示す。PMNの起爆圧 0.064 kgf/cm^2 が条件としては最も低い圧力で起爆し、すべてのタイヤにこの値を下回る接地圧が要求される。

Table 1 Ignition pressure

	PMN2	TYPE72	PMN
Ignition pressure [kgf/cm ²]	0.26	0.19	0.064

低接地圧タイヤの効果を検証するために、Fröhlichの公式を用いた地盤内応力の解析および圧力センサを用いた実験を行う。Fröhlichの公式を使うにあたって次の条件を仮定する。(1) 地面を半無限弾性板とする。(2) 荷重は楕円形状の等分布荷重とする。タイヤ荷重による地盤内応力を図4に示すように定義する。このとき、接地面である楕円の中心を通過する垂直応力はFröhlichの公式を用いて式(1)で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \frac{\lambda q z^\lambda}{2\pi} \iint_D (x^2 + y^2 + z^2)^{-\frac{\lambda}{2}-1} dS \\ &= \frac{\lambda q z^\lambda ab}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 r (r^2 (a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta) + z^2)^{-\frac{\lambda}{2}-1} dr d\theta\end{aligned}\quad (1)$$

Fig. 4 Subsurface stress by low-ground-pressure tire

Fig. 5 Subsurface pressure (inner pressure: 80hPa, weight: 24.75kg)

ここで、 q は地表面での圧力、 a は楕円形状の接地面の長軸、 b は短軸、 λ は応力集中係数を表す。さらに地中の物体には地中の媒質となる砂や土の自重も応力として付加される。地中媒質の自重をその単位体積重量 γ に比例すると仮定すると次式によって自重による地盤内応力が求められる。

$$\sigma_{zw} = \gamma z \quad (2)$$

式 (1) と式 (2) を加えた次式によって地盤内の応力を求めることが出来る。実際の地雷探知車両の条件を入れて求めた地盤内応力を図 5 中の実線で示す。

$$\sigma_z = \sigma_{zs} + \sigma_{zw} \quad (3)$$

地雷探知車両の重量は 88.0kg で前方左右輪には 24.75kg ずつ、後方左右輪には 19.25kg ずつ荷重がかかっている。そこで荷重の大きい前輪について平坦な場所で計測した結果を図 6 に示す。この図よりタイヤの空気圧は下げると接地面が増加するが、空気圧を下

Fig. 6 Contact area when weight is 24.75kg

げ過ぎると接触楕円の円周上に荷重が集中し、最大荷重が増加してしまうが、空気圧が約 80hPa のときに荷重分布もほぼ均等分布し最適であることがわかる。そこで、タイヤの空気圧は 80hPa とし、圧力センサの埋設深度を地表面である 0cm から地下 16cm までの場合に分けて測定を行う。その実験による測定結果および対象として対人地雷の起爆圧を図 5 に追記する。ほぼ理論値に近い実験結果が得られ、最大圧力が 0.062kgf/cm² となり、起爆圧である 0.064kgf/cm² と同程度であることが分かった。今後、車輪の大型化、車両の小型・軽量化を図ることで、容易に安全マージンを得ることが可能となる。

4. 低接地圧車両の力学モデル

トータルステーションおよび方位・傾斜計によって車両の位置と姿勢を計測することが可能であるが、トータルステーションから車両のノート PC に位置情報を転送するのに 1.0~1.5 秒程度の時間遅れが生じる。そこで正確な車両の力学モデルを用いてリアルタイムで車両の正確な位置を推定する。本章では低接地圧車両の力学モデルを構築する。

低接地圧タイヤでは、タイヤ内部の空気圧が低くタイヤ自身の剛性が低くなり、旋回時にタイヤの横方向の変形量が多い。そこで、低接地圧タイヤの力学モデルを求める。図 7 に示すようにタイヤを 3 方向のばねで近似したモデルとして扱う⁽⁶⁾。図 8 には接地面の横方向の変形を示す。変形したタイヤの接地面は (1) 粘着域: 接地面の方向が滑り角方向にほぼ一致する領域と、(2) すべり域: 接地面の方向が滑り角方向は追従せず、地面に対してタイヤがすべりを生じる領域の 2 つの領域に分けられる。また、粘着域では横方向の応力がタイヤの横方向の剛性と弾性変形によって支配され、すべり域では横方向の応力が接地圧とタイヤと地面との間の摩擦係数によって支配されることがわかっている⁽⁶⁾。図 9 に示すように、粘着域での横方向の変化は接地面の縦方向を ξ 軸、横方向を η 軸としたとき、すべり角 α を用いて次式で表される。

Fig. 7 Tire model of three directional springs

Fig. 8 Contact patch of tire

Fig. 9 Lateral deformation

Fig. 10 Lateral stress

$$\Delta\eta_\alpha = |\tan \alpha| \Delta\xi = S_\alpha \Delta\xi \quad (4)$$

よって、横方向の応力は

$$\sigma_{\eta\alpha}^{(a)} = k_y \Delta\eta_\alpha \quad (0 \leq \xi \leq l_a) \quad (5)$$

と求められる。ここで k_y は横方向の弾性係数、 l_a は粘着域とすべり域の境界までの長さを表している（図10参照）。

次に、すべり域での応力を求める。前述のとおりすべり域では横方向の応力が接地圧とタイヤと地面との間の摩擦係数によって支配されることから、

$$\sigma_{\eta\alpha}^{(s)} = \mu_y P \quad (l_a \leq \xi \leq l) \quad (6)$$

となる。ここで μ_y はタイヤと地面との間の摩擦係数、 P は垂直応力を表している。以上から全体の横方向の力は次のように求められる。

$$F_{\eta\alpha} = \int_0^l \sigma_{\eta\alpha} w d\xi = \int_0^{l_a} \sigma_{\eta\alpha}^{(a)} w d\xi + \int_{l_a}^l \sigma_{\eta\alpha}^{(s)} w d\xi \quad (7)$$

実際には、この横方向の力を圧力センサシートを用いて求める。圧力センサシートを使うことでタイヤ接地面の接地圧分布と接地面形状を計測することができる。その計測データをもとに、式(7)から横方向の力を計算することが出来る。そして、すべり角と横方向の力が一対一の関係にあると仮定することで、実際の制御中でも各タイヤのすべり角が分かれば、事前に圧力センサシートで計測したデータを用いて横方向の力を導出することが出来る。

次に、車両の力学モデルとして図11に示す4輪モデルを用い、車両の力学モデルを導出する。

実際の地形には多少の凹凸はあるが簡略化のため平坦とみなすと、車両の運動方程式は次式で表される。

Fig. 11 Vehicle kinematic model

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 Y_{xi} + \sum_{i=1}^4 N_{xi} + \sum_{i=3}^4 F_{xi} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = \sum_{i=1}^4 Y_{yi} + \sum_{i=1}^4 N_{yi} + \sum_{i=3}^4 F_{yi} \\ I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \sum_{i=1}^2 Y_i \cos(\alpha_i + \delta) l_f + \sum_{i=3}^4 Y_i \cos(\alpha_i) l_r \\ \quad + \sum_{i=1}^2 N_i \sin(\alpha_i + \delta) l_f + \sum_{i=3}^4 N_i \sin(\alpha_i) l_r \end{cases} \quad (8)$$

ただし、 m ：車両の質量、 N ：地面とタイヤの転がり抵抗、 F ：駆動力、 I ：重心周りの慣性モーメント、 δ ：ステアリング角、 l_f ：車体重心と前輪軸の距離、 l_r ：車体重心と後輪軸の距離である。また、このとき各タイヤのすべり角 α_i は車両のすべり角 α を用いて次式にて推定される。

Fig. 12 Blockdiagram

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = \frac{V \sin \alpha + l_f \frac{d\theta}{dt}}{V \cos \alpha - \frac{d}{2} \frac{d\theta}{dt}} - \delta \\ \alpha_2 = \frac{V \sin \alpha + l_f \frac{d\theta}{dt}}{V \cos \alpha + \frac{d}{2} \frac{d\theta}{dt}} - \delta \\ \alpha_3 = \frac{V \sin \alpha - l_r \frac{d\theta}{dt}}{V \cos \alpha - \frac{d}{2} \frac{d\theta}{dt}} \\ \alpha_4 = \frac{V \sin \alpha - l_r \frac{d\theta}{dt}}{V \cos \alpha + \frac{d}{2} \frac{d\theta}{dt}} \end{array} \right. \quad (9)$$

5. 軌道追従制御

5.1 制御手法 図12に提案した車両モデルを用いた軌道追従制御のための制御系を示す。速度は一定とし、ステアリング角 δ のみを制御入力として用いる。出力は一定時間ごとにトータルステーションによって計測される車両の位置 (x, y, z) と逐次計測される車両の姿勢角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ になる。今回は平坦地形を仮定しているので実際に必要となるのは現時点での x, y, θ_z になる。 θ_z は逐次計測されるのでそのままの値を用い、一定時間ごとにしか更新されない位置 (x, y) についてはこれまでに提案した車両モデルを用いて推定する。図13に示すように一定時間ごとに更新される状態を初期状態として現在までの経過時間から現在の状態を推定する。その推定値 $(\hat{x}, \hat{y})$ と実測値 θ_z をフィードバック値として用いる。フィードバック値と目標軌道との誤差にゲインを掛けた値に目標軌道に追従するための値を付加した値が実際に入力するステアリング角になる。

5.2 実験条件 実験フィールドはほぼ平坦な場所であり、地表面は砂で覆われている。実際の地雷原は凹凸があり、必ずしも平坦であるとは言えない。しかし、本車両は重機で一度地雷原を平坦にならした後

Fig. 13 Timing of position estimation and of data acquisition

Fig. 14 Vehicle trajectory in y direction

(レベル2サーベイ後)に使うことを前提としているため、平坦地で実験を行った。目標となる軌道は $y=0$ のレーンから $y=0.7\text{m}$ のレーンへの車線変更を行う軌道とした。車両の移動速度は 100mm/sec で固定し、加減速や旋回時も準静的として扱える速度である。

5.3 実験結果 図14に y 方向の車両の軌跡の時刻系列データを示す。車両の軌跡は滑らかで $y=0.7\text{m}$ のレーンにスムーズに移動できていることが分かる。図15(a)に目標の軌道と実際に車両の通過した軌跡を、図16に目標軌道との位置誤差を、図17に姿勢角誤差を示す。ここで $\Delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ 。車両は目標軌道を正確に追従していることが分かる。位置の目標軌道との誤差は $\pm 0.015\text{[m]}$ 以内に、姿勢角の誤差は $\pm 5\text{[deg]}$ 以内に収まっている。図15(b)はコーナリングフォースを近似した通常モデルを用いた場合の軌道追従実験の結果を示している。コーナリングフォースを近似したモデルを用いたときは、レーンの移動をする際の旋回動作時に軌道から大きく外れ追従していない。このことからコーナリングフォースを近似したモデルでは低接地圧車両の実際の挙動を現すことができていないと言える。

6. 斜面での軌道追従制御精度

斜面では、車両座標系から重力方向が異なり、各車輪への荷重も変化する。そこで、平地での実験と同じ条件（車両の移動速度は 100mm/sec 、 $y=0$ のレーンから $y=0.7\text{m}$ のレーンへの車線変更）にて、平均斜度 8.2° のコンクリートの傾斜地での軌道追従性を確認する。

(a) Proposed model

(b) Conventional linearization model

Fig. 15 Path of the vehicle

Fig. 16 Position error

Fig. 17 Posture error

その実験結果を図 18, 図 19 に示す。図 18 には実際にトータルステーションによって計測された位置を示している。図 19 にはそのトータルステーションの位置データと方位・傾斜計の姿勢データをもとに車両の予測モデルによってリアルタイムに計算した車両の位置を示している。距離誤差 d は、0.030m 以内と比較的良好な追従性を保っている。X=2.5m 付近で誤差が 0.068m と一度大きくなっているが、これは、プリズムの振動による外乱の影響と推定され、タイヤの静的な変形による誤差ではないと考えられる。それは、図 18 を見ると目標軌道から大きく外れたことを示す計測点は 1 点しかなく、その直後の計測点以降は、目標軌道にほぼ戻っており、すべての計測点が正しいとすると車両が高速に y 方向に移動したことになる。しか

Fig. 18 Vehicle position measured by total station

Fig. 19 Interpolated vehicle position using the proposed vehicle kinematics

し、これほど速く車両が操舵により移動することは物理的に不可能であるため、1 点の大きく外れた計測点に誤差が含まれていると考えられる。

7. 結 言

本論文では、埋設された対人地雷を起爆しない程度に地表面との接地圧力を低くすることが可能な低接地圧タイヤを用いた地雷探知車両およびその位置制御手法を提案した。まず、低接地圧タイヤが対人地雷の起爆圧を下回る接地圧力が実現可能であることを確認した後、変形量の大きい低接地圧タイヤに搭載した車両の位置制御精度向上を目的とし、車両のすべり角から各タイヤのすべり角および作用力を求め、車両の力学モデルから得られた推定位置からステアリング角を決定するアルゴリズムを提案した。また、平地および斜面での軌道追従実験を行い、十分な精度が得られることを確認した。

今後の課題として、地雷を起爆させない接地圧の安全率の向上および、実際の地雷原での作業を想定したインタフェースの整備を行う必要がある。

文 献

- (1) Fukuda T., Yokoe K., Hasegawa Y., and Fukui T., Land mine detection algorithm using Ultra Wide Band GPR, *Proceedings of the first International Symposium on Systems and Human Science for Safe, Secure, and Reliable Society: SSR*, (2003), pp.295-300.

- (2) Fukuda T., Hasegawa Y., Kosuge K., Komoriya K., Kitagawa F., and Ikegami T., Environment-Adaptive-Antipersonnel Mine Detection System, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.45, No.6, (2006) , pp.518–524.
 - (3) Nonami K., Development of mine detection robot comet-ii and comet-iii, *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference (SICE 2002)*, Vol. 1, (2002), pp.5–7.
 - (4) Kato K., and Hirose S., Development of the quadruped walking robot, titan-ix - mechanical design concept and application for humanitarian demining robot, *Advanced Robotics*, Vol.15, (2001) , pp. 191–204.
 - (5) Yabushita, H., Kanehama M, Hirata Y., Kosuge K., 3D Ground Adaptive Synthetic Aperture Radar for Landmine Detection, *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2005), pp.1861–1866.
 - (6) Gwanghun Gim, Parviz E. Nikraves, An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations. Part 1: Pure slips, *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 11, No. 6, (1990), pp.589–618.
-