

(33) 加速度センサ・ジャイロセンサを用いた 推進工法用ドリルヘッド位置・姿勢の推定手法

小木曾 里樹¹・水谷 孝一²・若槻 尚斗³・川村 洋平⁴

¹学生会員 筑波大学学士課程 理工学群工学システム学類 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail:ogiso@aclub.esys.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学教授 システム情報系(〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail:mizutani@iit.esys.tsukuba.ac.jp

³非会員 筑波大学准教授 システム情報系(〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)
E-mail:wakatuki@iit.esys.tsukuba.ac.jp

⁴正会員 Curtin Univ., Lecturer WASM, Dept. Mining Eng. (Kalgoorlie, WA6433)
E-mail: Yohei.Kawamura@curtin.edu.au

本稿では推進工法のドリルヘッドを対象とし、加速度センサ・ジャイロセンサ・測長機を用いることでドリルヘッド直上に計測器の不要な位置推定手法を提案する。加速度センサ・ジャイロセンサの観測信号から拡張カルマンフィルタによってドリルヘッドの姿勢を推定、ドリルヘッドの送り量を推進器に取り付けた測長機によって計測、これらから現在のドリルヘッドの位置を推定する。シミュレーションによって30 m程度の施工を模擬し、ジャイロセンサのバイアスとして0.005 rad/sを各軸に関して付加、ドリルヘッドの振動による影響を考慮するため分散9.8 m/s²、0.5 rad/sのガウスノイズをそれぞれ加速度センサ、ジャイロセンサの出力に付加し、これに提案手法を適用した、振動は確率的に発生するものとし、100回の試行を行い、ジャイロセンサのみを用いて位置推定を行う従来手法と比較した。その結果、ジャイロセンサのみを用いた場合、姿勢の誤差は3軸の平均で0.26 radであったものが提案手法では0.10 rad程度に低減し、位置の推進距離に対する誤差率は2割程度低減されることを確認した。位置の誤差率は10%程度の誤差率でドリルヘッドの位置を推定可能であることを確認した。誤差はジャイロセンサのバイアスが支配的であるため、その推定を行うことで、実用的な精度にすることが可能である。

Key Words : horizontal directional drilling, inertial measurement, extended kalman filter

1. 背景

道路など既存のインフラを開削せずに電源ケーブルや水道管などの配管を敷設できる工法として、推進工法が近年注目されている¹⁾。この工法は開削の必要がなく、道路の交通規制、騒音の被害や環境への影響が少ないことから、地下埋設管の敷設に積極的に採用されている²⁾。推進工法によって正確に掘削するためには、水平ドリルの位置・姿勢を正確に把握することが必要である。従来

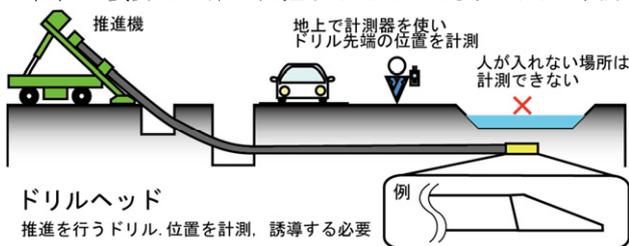


図-1 推進工法の課題

は、ドリルヘッドから電波を発信し、受信強度からドリルの位置・姿勢を推定する手法が用いられている³⁾が、この手法ではドリル真上で電波を受信する必要がある、**図-1**に示すように真上に河川がある場合など作業員が立ち入れない場合には推定が困難である。一方、情報化施工の分野においては施工の管理や現場周辺の状況の把握、無人化のための研究が進められており⁴⁾、大口径の推進工法においても危険な地域における施工時に構内を無人化する技術が開発されている⁷⁾。この時、従来手法では、位置推定のために人手が必要であることや、断続的に行うため制御に用いることは難しいことから、施工の完全な無人化は困難である。これらの問題のに対して、電波を用いない位置推定の手法が数多く研究されており、磁場を用いる方法⁸⁾、ジャイロセンサを用いる方法⁹⁾、ジオフォンアレイを用いる方法¹⁰⁾などが提案されているが、電源などの人工雑音により精度が充分でない場合があること、初期姿勢に対する相対的な姿勢を積分により求め

るため誤差が蓄積すること、多くのジオフォンを敷設する必要があることなどの問題がある。

そこで本研究では、加速度センサ・ジャイロセンサ・測長機を用いることで、作業員が不要なドリルヘッド位置・姿勢推定手法を提案する。加速度センサ・ジャイロセンサを用いた3次元での姿勢推定方法はこれまで、航空機・移動ロボットなどの慣性誘導・位置推定などのために数多くの研究がなされている¹¹⁻¹³⁾。これらの手法では直接変位を計測できないため加速度を2階積分して位置を求める。このため誤差が大きくなるおそれがあるが、本研究では推進工法を対象とするので、送り量から推定対象であるドリルヘッドの変位が計測できる。そこで本研究では、加速度センサ・ジャイロセンサを姿勢推定のみを用い、変位は測長機によってドリルシャフトの送り量を計測することで、位置推定を行う。

2. 推定原理

(1) 概要

本稿では、加速度センサ・ジャイロセンサ・測長機を用いることで、ドリルヘッド位置を推定できる手法を提案する。従来法のジャイロセンサを用いた3次元での姿勢推定に加え、加速度計による姿勢の補正を行うことで従来法の問題である姿勢のドリフトを解決する。さらに、ドリルヘッドの姿勢とドリルシャフトの送り量から、推定対象であるドリルヘッドの変位を推定する。

(2) ドリルヘッドの姿勢推定

ドリルヘッドの姿勢推定には、拡張カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter 以下、EKF)¹⁴⁾を用いる。EKFによる姿勢推定のアルゴリズムを以下に述べる。

まず、ドリルヘッドで観測したドリルヘッドの角速度を ω 、重力加速度を \mathbf{a} 、姿勢を表すクォータニオンを \mathbf{x} とする。一般に、 \mathbf{x} と ω の関係は式(1)であらわされることが知られている。

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{1}{2} \mathbf{x}(\omega)_q \quad (1)$$

ここで $(\omega)_q = [0 \ \omega]^T$ であり、 ω を便宜上クォータニオンの形式にしたものである。これによる時間ステップ Δt 秒間の \mathbf{x} の時間発展を表す関数、姿勢が \mathbf{x} のときドリルヘッドから観測した重力加速度のベクトルを求める関数をそれぞれ $f(\mathbf{x})$ 、 $h(\mathbf{x})$ とし、以下のように定義する。

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{x} + \frac{1}{2} \mathbf{x}(\omega)_q \Delta t \quad (2)$$

$$h(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^* (\mathbf{g})_q \quad (3)$$

ここで \mathbf{x}^* は \mathbf{x} に共役なクォータニオンであり、 $(\mathbf{g})_q$ は地面座標系から観測した重力加速度 \mathbf{g} に対し、 $(\mathbf{g})_q = [0 \ \mathbf{g}]^T$ として定義する。これらを用いると、ドリルヘ

ッドの運動は次式に示す状態方程式で表される。

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = f(\mathbf{x}(t)) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(t) = h(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{v} \quad (4)$$

ここで \mathbf{v} は加速度計に加わる外乱であり、主としてはドリルの振動が想定される。

このシステムに対し、EKFを適用し、 \mathbf{x} を推定することでドリルヘッドの姿勢を得る。いま、時刻 t において推定した時刻 t 、時刻 $t + \Delta t$ における \mathbf{x} をそれぞれ $\hat{\mathbf{x}}_{t/t}$ 、 $\hat{\mathbf{x}}_{t+\Delta t/t}$ 、時刻 $t - \Delta t$ において推定した時刻 t における \mathbf{x} を $\hat{\mathbf{x}}_{t/t-\Delta t}$ とし、これらの推定誤差の共分散行列を $\mathbf{P}_{t/t}$ 、 $\mathbf{P}_{t+\Delta t/t}$ 、 $\mathbf{P}_{t/t-\Delta t}$ とすると、推定のアルゴリズムは以下のように表すことができる。

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}_{t/t-\Delta t} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{t/t-\Delta t} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t/t} = \hat{\mathbf{x}}_{t/t-\Delta t} + \mathbf{K} (\mathbf{y} - h(\hat{\mathbf{x}}_{t/t-\Delta t})) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{t/t} = \mathbf{P}_{t/t-\Delta t} - \mathbf{K} \mathbf{H} \mathbf{P}_{t/t-\Delta t} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{t+\Delta t/t} = f(\hat{\mathbf{x}}_{t/t}) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{t+\Delta t/t} = \mathbf{F} \mathbf{P}_{t/t} \mathbf{F}^T + \mathbf{Q} \quad (9)$$

ここで \mathbf{R} は観測誤差の共分散行列、 \mathbf{Q} はシステムノイズの共分散行列、 \mathbf{F} 、 \mathbf{H} はそれぞれ次式で与えられるヤコビアンである。

$$\mathbf{F} = \left(\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right)_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{t/t}}, \quad \mathbf{H} = \left(\frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right)_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{t/t-\Delta t}} \quad (10)$$

これらを1ステップとし、 Δt 秒後に $t + \Delta t \rightarrow t$ 、 $t \rightarrow t - \Delta t$ として推定を繰り返すことで、 $\hat{\mathbf{x}}_{t/t}$ を得る。

(3) ドリルヘッドの位置推定

前節で推定した $\hat{\mathbf{x}}_{t/t}$ から、ドリルの進行方向が分かる。これを用いて、地面座標系におけるドリルヘッドの変位を求める。ドリルヘッドはそれ自身に固定された座標系の x 軸方向に進行するとし、測長機で計測した Δt 秒間に推進された距離を Δl とすれば、地面座標系における変位 $\Delta \mathbf{p}$ は次式で表される。

$$[1 \ \Delta \mathbf{p}]^T = \hat{\mathbf{x}}_{t/t}^* [1 \ \Delta l \ 0 \ 0]^T \hat{\mathbf{x}}_{t/t} \quad (11)$$

これを用いて、ドリルヘッドの位置 \mathbf{p} は $\mathbf{p} = (x, y, z) = \Sigma \Delta \mathbf{p}$ として推定できる。提案手法の位置・姿勢推定のブロック線図を図-2に示す。

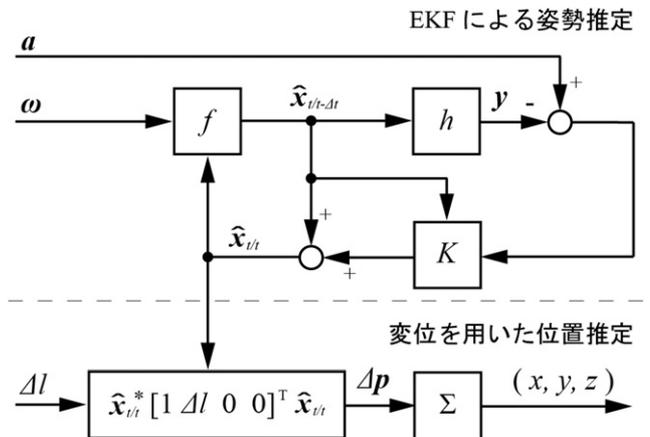


図-2 位置・姿勢推定の原理

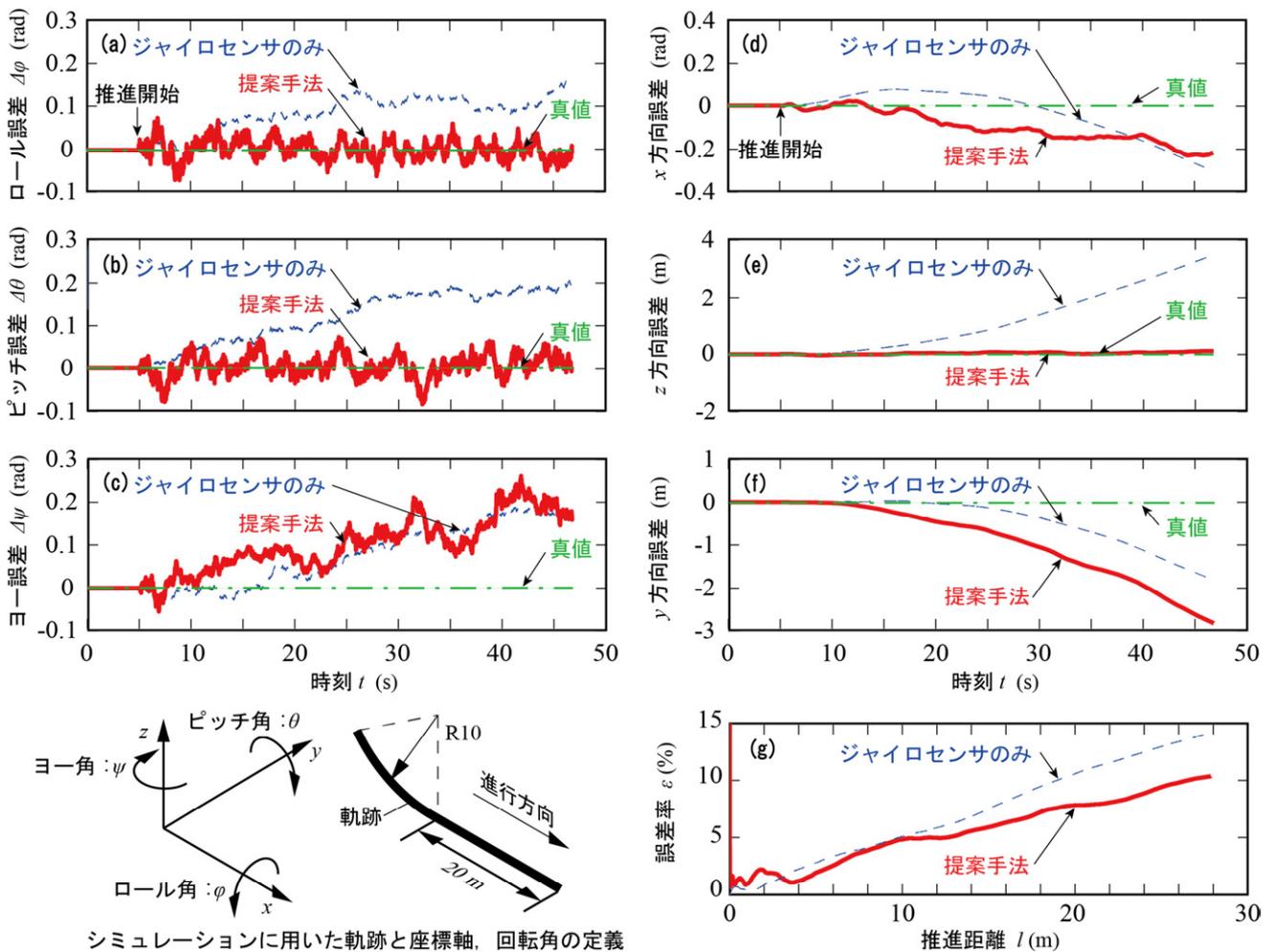


図-3 シミュレーション結果 (a) ロール角の誤差, (b) ピッチ角の誤差, (c) ヨー角の誤差, (d) x軸方向の誤差, (e) y軸方向の誤差, (f) z軸方向の誤差, (g) 推進距離に対する位置の誤差率

3. シミュレーション

(1) 条件

提案手法の効果を検討するため、実際の施工を模した軌跡でシミュレーションを行った。シミュレーションでは、シミュレーション開始5秒後に推進を開始し、地面に対し45 degの角度でドリルヘッドを侵入させ、R10の曲率半径でドリルヘッドが水平になるまで推進後、20 m直進するものとした。この時ドリルヘッドに取り付けた加速度センサ・ジャイロセンサで観測される加速度・角速度を記録、これをもとにドリルヘッド位置の推定を行った。これらのセンサには振動による外乱が入るものとし、実際には重機の騒音¹⁵⁾と同様に特徴のある信号であることが予想されるが、本研究ではまず外乱が加わること自体の影響をみるため、容易に生成できるガウスノイズを加えることとし、それぞれに分散0.5 rad/s²、9.8m/s²のガウスノイズを加えた。また、ジャイロセンサのバイアスによる影響を考察するため、ジャイロセンサの各軸の出力には0.005 rad/sのバイアスを加えた。提案手法と

比較するため、従来手法であるジャイロ스코ープのみを用いた手法⁹⁾についてもシミュレーションを行う。

(2) 結果と考察

ノイズはガウスノイズとし、確率的に発生するものであるため、シミュレーションを繰り返して誤差率を求めた。その結果、姿勢の推定誤差は、ジャイロセンサのみを用いる場合は3軸の合計で0.26 rad程度であるのに対し、提案手法では0.1 rad程度と半分以下に低減された。また、位置推定の誤差率についても、ジャイロセンサのみの場合は15%程度であったものが10%程度へと低減された。これらの理由について、図-3に示すシミュレーションを行ったうち代表的な結果を用いて考察する。図-3中の実線が提案手法、点線がジャイロ스코ープのみを用いる手法、一点鎖線がシミュレーションにより得た真値である。まず、姿勢の推定について考察する。図-3(a), (b)から、ジャイロ스코ープのみの場合より、加速度センサを用いた提案手法のほうがx軸周りの誤差(ロール角誤差)、y軸周りの誤差(ピッチ角誤差)ともに小さくなっていることが確認できる。これは、ジャイロセンサのバイアス

によるドリフトを加速度センサが補償していること示している。大きく振動しているのは、加速度センサに加えられた外乱の影響であると考えられる。一方で、加速度センサではz軸周りの姿勢（ヨー角）を補正できないため、**図-3(c)**に示すように加速度センサを用いた提案手法とジャイロスコープのみを用いた手法の誤差がほぼ一致している。

つぎに、位置の推定について考察する。**図-3(d)**に示すx軸方向の誤差に大きな差はない。これは、x軸は進行方向であり、姿勢の推定誤差は 10^{-1} radのオーダーであるため、その影響が殆ど出ないためであると考えられる。ジャイロセンサのみを用いる場合は誤差が円弧状になっているが、これは**図-3(a)(b)**に示すロール角、ピッチ角の推定誤差によって本来はy, z軸方向の誤差がx軸方向に影響しているためである。z軸方向の誤差に関しては、**図-3(e)**に示すように、ジャイロスコープによるドリフトの影響を補償できている。これは、提案手法では**図-3(b)**のようにピッチ角の誤差が小さくなっているためである。**図-3(f)**に示すy軸方向の誤差は、ジャイロスコープのみを用いる場合に比べ増大している。両者の挙動は10 s付近から大きく異なっており、これは**図-3(c)**のヨー角の誤差が10 sから18 sの間提案手法のほうが大きくなっていることが原因と考えられる。この誤差は、加速度センサの外乱によるものと考えられる。

最後に、推進距離に対する誤差率を**図-3(g)**に示す。提案手法の誤差率は7 m付近まではジャイロスコープのみを用いた場合に比べ大きいですが、その後は下回っている。これは、施工開始から少ない時間しか経っておらず推進距離が短い場合、ジャイロセンサのドリフトの影響より加速度センサの外乱による影響のほうが大きいためであると考えられる。7 m以降は、加速度センサによるバイアスの補償により、提案手法のほうが誤差率を少なく抑えられている。ただし、先に述べたようにヨー角の補償ができないため、y軸方向のドリフトは取り除けず、これが提案手法の誤差率を決定している。このことから、今後は姿勢のドリフトのみならず、その原因であるバイアスの推定を行い、補償を行うことが重要である。

4. 結論

本稿では、加速度センサ・ジャイロセンサを用いた位置推定手法をシミュレーションによって検討した。このとき、振動による外乱やジャイロセンサのバイアスによる影響を考察するため、その結果、外乱下でも誤差率は10%程度であり、ジャイロセンサのみを用いた場合より誤差率を2割程度低減できること、この誤差はジャイロ

センサのバイアスによるドリフトであることを確認した。今後は実際のドリルの振動による外乱の推定誤差に対する影響を調べるとともに、土中を進むドリルをモデル化するなどし、ジャイロセンサのバイアスを推定することが必要である。

参考文献

- 1) 日本ダクタイル鉄管協会：ダクタイル管による推進工法，日本ダクタイル鉄管協会技術資料，JDBA T 33，2000.
- 2) 石川 和秀：非開削工法の総合評価—道路を掘らない非開削技術は社会と環境にやさしい—，ベース設計資料，No.136 土木編，pp.65-68，2008.
- 3) 松本 重貴，長尾 康之：環境磁気雑音下における非開削工法用掘削位置測定法，2001年電子情報通信学会総合大会，p.243，2001.
- 4) 三浦 悟：4. 土工事における情報化施工(GPS と情報化施工)，土と基礎，53巻12号，pp.115-124，2005
- 5) 建山 和由：情報化施工の現状と今後の展望について：機械化施工について<特集>情報技術の現場での活用)，58巻5号，pp.6-9，2010.
- 6) 茂木 貴弘，水谷 孝一，海老原 格：地表付近における気温分布計測のための音響 センサネットワークユニット，土木学会論文集 A2，Vol. 67，No. 2，pp. I_31-I_38，2011.
- 7) 岡村 道夫：長距離・急曲線に対応した防爆型推進工法—9連曲線推進施工報告—，月刊推進技術，Vol. 18，No. 6，pp.53-59，2004.
- 8) 斎藤 利行，佐藤 享，松本 重貴，原田 茂：人工雑音の特徴解析とその環境下における地下掘削ドリルヘッド位置検出法の開発，pp.21-28，信学技報，SANE2001-53，2001.
- 9) 杵山 義弘，日野 英則：光ファイバジャイロによる小口径推進マシンの連続高精度位置検知システム，土木学会第57回年次学術講演会，pp.587-588，2002.
- 10) J. Tamura, Y. Kawamura, H. Mochiji, N. Sasaki, K. Mizutani, and H. Okawa: A Method for Estimating the Location of the Drill-Bit During Horizontal Directional Drilling Using a Giant-Magnetostrictive Vibrator, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, pp.07HC15-1-07HC15-6, 2011.
- 11) 鈴木 智，中澤 大輔，野波 健蔵，田原 誠：クォータニオンフィードバックによる小型電動ヘリコプタの姿勢制御，日本機械学会論文集 (C 編)，76 巻 761 号，pp. 51-60，2010.
- 12) K. Edgar: A quaternion-based unscented Kalman filter for orientation tracking, Proceedings of the Sixth International Conference of Information Fusion, 2003, Vol.1, pp.47-54, 2003.
- 13) A. M. Sabatini: Kalman-Filter-Based Orientation Determination Using Inertial/Magnetic Sensors: Observability Analysis and Performance Evaluation, Sensors, Vol.11, pp.9182-9206, 2011.
- 14) 鈴木 智，田原 誠，中澤 大輔，野波 健蔵：動加速度環境下における姿勢推定アルゴリズムの研究，日本ロボット学会誌，Vol.26，No.6，pp.626-634，2008.
- 15) 永井将紀，若槻尚斗，水谷孝一，金澤朗蘭：重機騒音調査のための卓越周波数を利用した方向推定，土木学会論文集 F3，Vol.67，No.2，pp.I_162-I_169，2011.