

ロボットによるネジ締め作業における異常検出アルゴリズム

松野 隆幸^{*1} 白土 浩司^{*2} 黄 剣^{*3} 福田 敏男^{*4}

Fault Detection Algorithm for Thread Fastening by Robotic Manipulator

Takayuki Matsuno^{*1}, Koji Shiratsuchi^{*2}, Jian Huang^{*3} and Toshio Fukuda^{*4}

Fault detection functions of a robotic manipulator are very useful for factory automation. All production has the possibility to fail due to unexpected accidents. To reduce the fatigue of human workers, small errors automatically should be corrected by a robot system. In this paper, an external thread fastening task by a robotic manipulator is investigated. To discriminate the four states of a task, linear support vector machine methods with two feature parameters are introduced. One is the estimated insertion length, and the other is the maximum reaction force. The effectiveness of the proposed algorithm is confirmed through an experiment and recognition examination.

Key Words: Fault Detection, Support Vector Machine, Assembly, Thread Fastening

1. はじめに

工場における組立作業の自動化において異常検出機能は有効であることが確認されている [1] [2]。現在、工場で労働者によって行われている難組立作業 [3] をロボットで行うと失敗する可能性を否定できない。そのため、チョコ停と呼ばれる短期間の障害による作業停止によって生産ラインの効率低下を避けるために、ロボットによる自動化ラインは監視員を配置する必要がある。そして、監視員はときどき起こる、軽度であるが予測できない異常状態の原因を取り除く必要がある。監視員の負担を軽減するために、そのようなチョコ停から自動的に復旧するロボットシステムが望まれている。本論文ではロボットによるネジ締め作業に注目し、その異常状態の検出アルゴリズムを提案する。ほとんどの家電製品はプラスチック成型部品またはプレス金属部品と、電子基板から構成されるため、ネジ締め作業は避けることのできない工程である。

ネジ締め作業に注目した従来研究に注目すると、Klingajay ら [4] はネジの直径や締め付け抵抗などのパラメータをオンラインで推定する手法を提案している。また、Mrad ら [5] はネジ締めの失敗を避けるために、ファジロジックによって、ネ

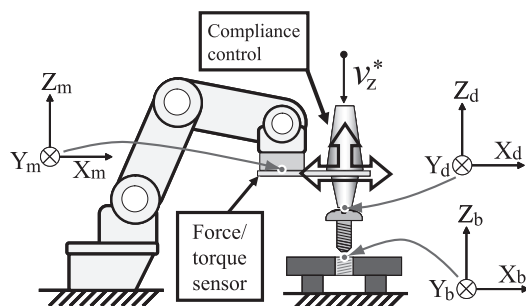


Fig. 1 Robot system configuration for thread fastening task

ジ締めドライバーと xyz-ステージの制御手法を提案している。Pitipong ら [6] 画像認識を用いたネジ締めシステムを提案しており、B.R.Zuo [7] らはネジが付いたエンドエフェクタによる、電化製品などの解体用ロボットシステムを提案している。

これらの研究に対して実際の生産ラインでの異常検出では主に、ネジ締め用ドライバーに流れる電流を監視することで、トルクアップを検出している。この手法はネジ喪失時には有効であるが、ネジの挿入量が分からないため締め付け途中で起こった異常が発見できないという問題がある。本論文ではそのような問題にも対応できる手法を提案する。現在の工場ラインではネジ締め作業は専用機で行われているが、本論文ではロボットマニピュレータによってネジ締め作業を実現することを想定している。このとき、Fig. 1 にあるようにロボットは接触によるダメージを防ぐため、コンプライアンス制御を手首に取り付けた力センサの情報を基に実現されていることが想定される。

本論文では Fig. 2 に示す作業終了時の四つの状態を判別することを目的とする。ここでは四つの状態について述べる。Fig. 2 (a)

原稿受付 2011 年 12 月 9 日

^{*1}岡山大学大学院

^{*2}三菱電機株式会社

^{*3}华中科技大学

^{*4}名古屋大学大学院

^{*1}Okayama University

^{*2}Mitsubishi Electric Corporation

^{*3}Huazhong University of Science and Technology

^{*4}Nagoya University

■ 本論文は学術性で評価されました。

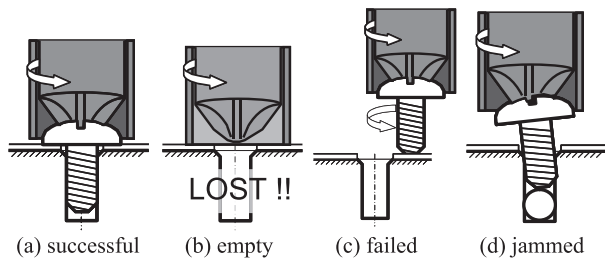


Fig. 2 External thread fastening task states

は成功状態 (successful state) であり、ロボットは次の作業に移行することができる。Fig. 2 (b) はネジ喪失状態 (empty state) であり、何らかの理由でネジ搬送中にネジをなくしてしまった状態を仮定している。ロボットは新しいネジを獲得し、再び作業を試行する必要がある。Fig. 2 (c) は穴不一致状態 (failed state) であり、ロボットは穴の位置を確認し、目標軌道を修正する必要がある。最後は Fig. 2 (d) はネジつまり状態 (jammed state) であり、ネジ穴の中に障害物があることや、雄ネジの不良によりネジが途中でつまる状態である。この状態ではロボットはネジを抜いて再度試行する必要がある。

本論文ではこれら四つの状態を、二つの特徴量を用いたサポートベクターマシン (SVM) [8] で判別するアルゴリズムを提案する。一つの特徴量はネジの推定挿入量である。これは、ロボットによるネジ締め作業に起こる力センサで計測されるトルクの振動現象を利用したものである。本論文ではこの振動が起こる理由についても述べる。ネジの挙動の解析は従来研究では広瀬ら [9] によるものがあるが、これは動力伝達機構のネジに関するもので、一般的な取り付け用ネジの挙動を解析したものを見当たらない。もう一つの特徴量は最大挿入反力である。

最後に、提案する手法の有効性は、実機ロボットマニピュレータでの実験のデータを用いた認識テストにより確認した。

2. ロボットによるネジ締め作業実験

本章ではまずロボットによるネジ締め作業の実験条件について述べ、次にそれぞれの作業状態におけるロボットのデータを示し、最後に状態判別の難しさを述べる。

2.1 実験条件

本論文におけるロボットによるネジ締め作業実験では Fig. 1 にあるようにロボットの手先に力センサを介してネジ締め用ドライバが取り付けられている。ここで、“m” フレームは力センサ座標系であり、異常検出に用いる。また、“d” フレームは手先効果器の座標系であり、ネジ締め用ドライバの先端に設定されている。次に、“b” フレームはベース座標系として設定する。その中心はネジ穴の中心線とネジ穴の土台の上部平面の交点である。また作業の初期状態において “m” フレームと “d” フレームは “b” フレームと同じ xyz 方向成分を有する。

実験に用いたロボットは三菱電機社製マニピュレータ RV6SD である。実験の様子を Fig. 3 に示す。マニピュレータは Fig. 4 に示すブロック線図で表される、力センサを用いたコンプライアンス制御によって制御されている。力センサ情報の更新周期は約 7 [ms] である。ここで、 $K_f = \text{diag}(0.11, 0.11, 0.014, 0.0, 0.0,$

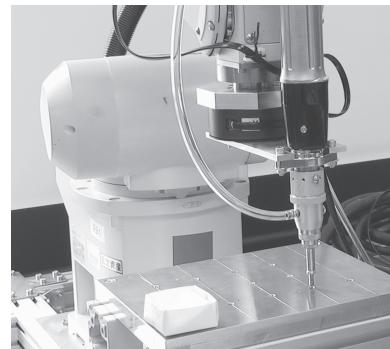


Fig. 3 Robotic manipulator system for thread fastening

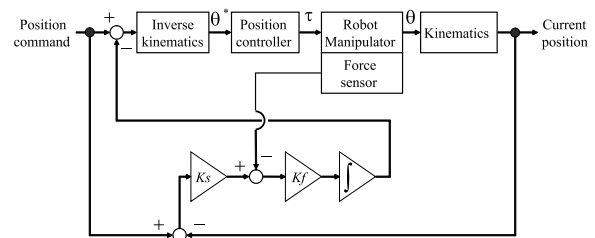


Fig. 4 Block diagram of robot control with force feedback

0.0) [m/Ns] は力制御のゲイン行列であり、 $K_s = \text{diag}(100.0, 100.0, 100.0, 0, 0, 0)$ [N/m] はステイフネス行列である。コンプライアンス制御の制御点は Fig. 1 の “d” フレームに設定する。この制御によって、マニピュレータは x_b, y_b, z_b の座標の移動方向にコンプライアンスを持っており、 x_b, y_b, z_b の座標の回転方向にはコンプライアンスを持たない。マニピュレータは作業終了時にネジとネジ穴の中心が一致するために x_b, y_b 方向にコンプライアンスを設定する。また、高精度の位置制御によって発生する過大な力によってネジがネジ穴を傷つけないように z_b 方向にコンプライアンスを設定する。

ここで、ネジ締め作業時のドライバ先端の様子を Fig. 5 に示す。実験に用いたネジのサイズは M5 × 12 [mm] (ピッチ 0.8 [mm]) で、ステンレス製である。ネジ穴は剛性の高いアルミ製のベースに、ネジよりも十分に深いネジ穴 (M5 ピッチ 0.8 [mm]) が貫通している。ネジ穴は JIS 規格メートル並目ネジの 2 級の最大許容寸法に従っている。この条件化では締め付け作業によってネジ頭が土台と接触し、摩擦していないと、固定できないほどネジ穴はネジよりも大きい。

本論文では HIOS 社製のネジ締め用ドライバ CLF-7000 (サクション機能付き) を用いた。ネジ締め用ドライバはバキュームによってネジをドライバ先端に吸着した状態を維持できる。ネジ締め用ドライバの角速度 ω_d は設定値であり、アルゴリズムを構築する上で既知である必要がある。本論文では常に $\omega_d = 14\pi$ [rad/s] である。また、ネジ締め用ドライバには十分なトルクが発生し、ネジ締めの過程でも角速度は維持できるものとする。ロボットマニピュレータは xyz 方向にコンプライアンス制御されており、手先目標位置は鉛直下向きに v_z^* の速度で移動する。 v_z^* は式 (1) で計算される。

$$v_z^* = \alpha_z l_p \frac{\omega_d}{2\pi} \quad (1)$$

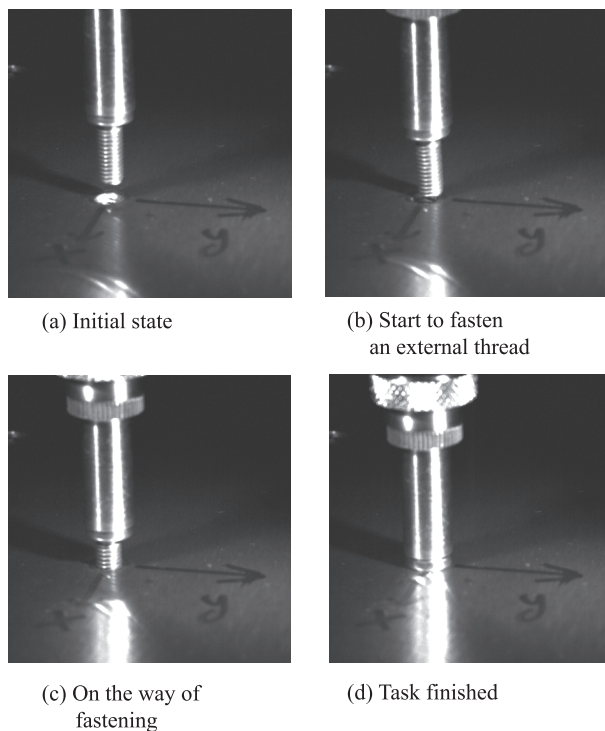


Fig. 5 Appearances of external thread fastening

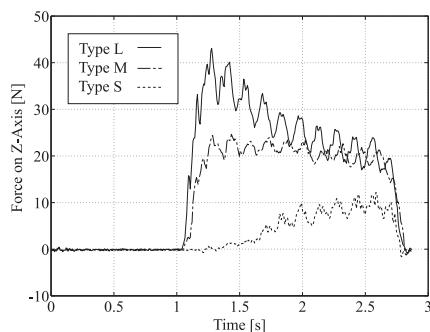


Fig. 6 Measured reaction force on z_m -axis in the successful state

ここで l_p はネジのピッチであり, α_z は速度係数で 1.03 に設定している.

そして, ロボットの停止条件は次の二つに設定した.

- (1) 手先位置が到達目標位置に到達した場合.
- (2) 挿入反力が閾値 F_{zmax} を超えた場合.

本論文では F_{zmax} は 50 [N] に設定した. また, 到達目標位置はネジがない状態で穴のベース部分とドライバ先端が衝突する直前の位置に設定する.

2.2 実験結果

ネジ締め作業実験はそれぞれの状態を故意に発生させる環境下で, データ取得をするためにそれぞれ 50 回ずつ実験を行った.

ロボットによるネジ締め作業のデータを Fig. 6~Fig. 10 に示す. 成功状態における z_m 方向に発生する反力を Fig. 6 に示す. 同じ成功状態の中でも挿入反力の最大値の違いにより Type S, M, L と分けた. Type S, M, L の違いが発生する原因は,

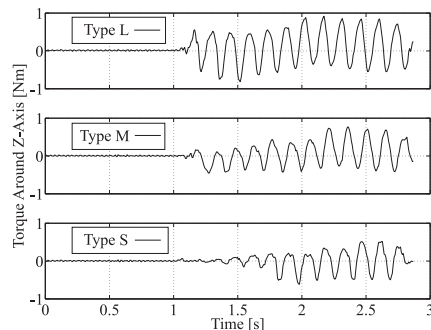


Fig. 7 Measured reaction torque around the z_m -axis in the successful state

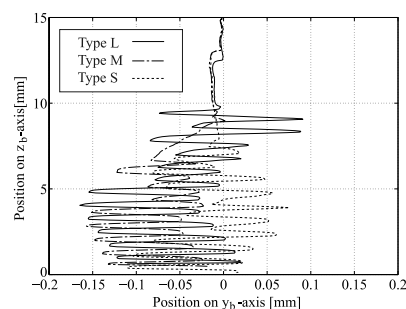


Fig. 8 Position of the tip of the screwdriver on the $y_b z_b$ -plane

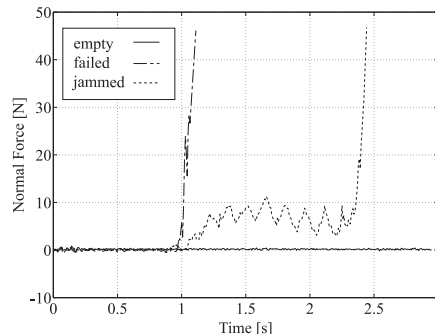


Fig. 9 Measured reaction force on the z_m -axis in the three error states

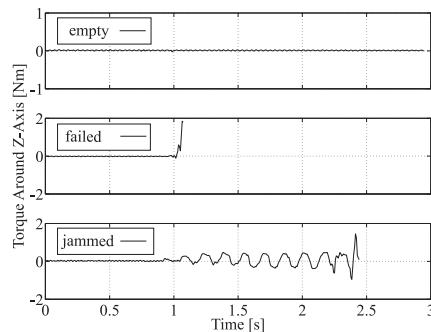


Fig. 10 Measured reaction torque around the z_m -axis in the three error states

ネジ締めドライバの回転と鉛直方向の手先移動動作の位相のずれである. 位相があっている場合は Type S のように初期の挿入反力が小さい. 一方位相がずれた場合は Type M や Type L

のように挿入開始直後に大きな反力が発生する。

それぞれ 1.0 秒付近でネジの接触が始まっている。もし、同期が完全な状態で行われたとすると、挿入反力は発生しない。しかし、異常検出においては挿入反力は重要な情報であるため、どのような位相でも反力が発生するように式 (1) の α_z によって目標位置の移動速度を速めている。

次に Fig. 7 には z_m 軸回りの反モーメントを示す。モーメントの振動はネジ締め用ドライバの回転と同じ周期で発生している。振動の発生理由は 3 章で述べる。ここで、 y_b - z_b 平面におけるネジ締めドライバ先端の軌道を Fig. 8 に示す。コンプライアンス制御を実施しているので、ネジからの力に応答して軌道が振動していることが分かる。しかし、ネジとネジ穴の挿入軸を一致させるために力制御系を構築用いているため、ネジ締めによって発生する振動をすべて打ち消せていない。

また、三つの異常状態における挿入反力を Fig. 9 に示す。ネジ喪失状態では挿入反力は発生せず、ネジつまり状態と穴不一致状態では反力が上限に達することで作業が終了している。最後に Fig. 10 に反モーメントを示す。挿入動作時には振動が発生していることが分かる。

2.3 異常検出の難しさ

一般的な組立作業であれば、挿入反力とロボット手先位置の軌道を計測し、反力を閾値処理することで挿入時間や挿入移動量を計算することは難しくない。しかし、ネジ締め作業においては Fig. 6 に示すように、同じ成功状態であってもネジの位相によって挿入反力の最大値がまちまちであり、適切な閾値を設定することは困難である。そこで、これまでの組立作業とは異なる異常検出手法が必要となる。

3. ネジ締め作業における振動現象

本章では、2.2 節での実機実験で発見したトルクデータの振動現象を解析する。この現象は人間によるネジ締めでは起こらず、機械装置特有のものであることを説明する。

3.1 ネジ締め実験の作業環境

本節では、振動現象を説明するために、ネジ締め作業の状態と、パラメータを定義する。まず、Fig. 11 にあるように、ネジがネジ穴の中で二点で接触している状態を考える。接触している二点を通る鉛直方向に平行な面を xz 平面とする“s”フレー

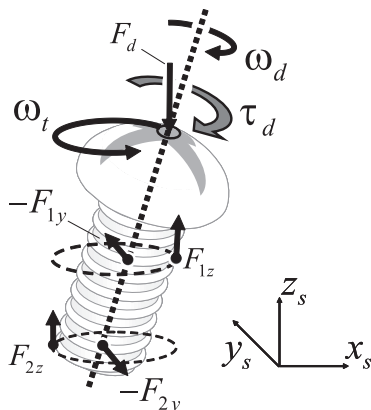


Fig. 11 Force and torque acting on external thread

ムの座標系をとると、ネジ穴の中でのネジの状態は Fig. 12 のようになる。工具としてのネジは、ネジ穴の直径はネジの直径よりも、大きいので、上部から押さえつけられると、Fig. 12 にあるように θ_s [rad] の角度で傾いた状態にある。このときのパラメータの定義を Table 1 に示す。

3.2 準静的な運動解析

本節では回転に伴う振動が起こる現象を説明する。ネジは締めつけ前は、吸着用バキュームによって、ネジ締めドライバ先端に取り付けられ、ドライバとともに回転している。ネジ締めドライバは十分大きいトルク τ_d で、 ω_d の角速度を保っている。押し付け力 F_d によってネジ頭頂部が押し付けられているときの挙動を考える。まず、ネジの山とネジ穴の山の接触点が二つ存在する。上部の位置を P_1 とし、下部の位置を P_2 とすると、その反力 F_{1z}, F_{2z} は

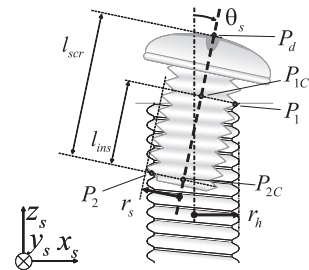


Fig. 12 Configuration of external thread in internal thread hole

Table 1 Symbols for model of external thread dynamics

symbols	meanings	units
F_d	force vecotor from a screwdriver to an external thread.	[N]
F_1	force from threaded hole on P_1 . the elements are $[F_{1x} F_{1y} F_{1z}]^T$.	[N]
F_2	force from threaded hole on P_2 . the elements are $[F_{2x} F_{2y} F_{2z}]^T$.	[N]
l_{scr}	whole length of external thread.	[m]
l_{ins}	inserted length of external thread.	[m]
P_1	upper contact point between external thread and hole.	
P_2	lower contact point between external thread and hole.	
P_{1C}	the cross point between center axis of external thread and vertical plane which passes P_1 .	
P_{2C}	the cross point between center axis of external thread and vertical plane which passes P_2 .	
P_d	contact point between external thread and screwdriver	
r_s	radius of external thread.	[m]
r_h	radius of threaded hole.	[m]
τ_d	driving torque to fasten an external thread generated from motor of screwdriver.	[Nm]
ω_d	angular velocity of rotation motion of external thread.	[rad/s]
ω_t	angular velocity of orbital motion of external thread.	[rad/s]

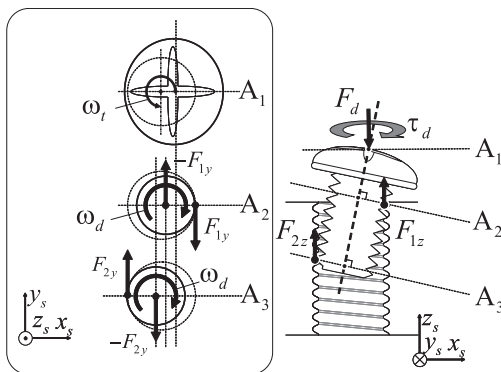


Fig. 13 External thread and threaded hole

$$F_{1z} = \frac{r_h + \epsilon}{2r_h} F_d \quad (2)$$

$$F_{2z} = \frac{r_h - \epsilon}{2r_h} F_d \quad (3)$$

と求めることができる。ここで

$$\epsilon = \left(l_{scr} - \frac{l_{ins}}{2} \right) \sin \theta_s \quad (4)$$

である。

ここでまず、各接触点ではすべりが発生せず、固着状態であることを仮定する。Fig. 13にあるように点 P_1 , P_2 ではそれぞれ摩擦力 F_{1y} , F_{2y} が発生し、この反力が最大静止摩擦力よりも小さいとき固着状態を維持しており、

$$F_{1y} = \frac{\tau_d}{2r} < \mu F_{1z} \quad (5)$$

$$F_{2y} = \frac{\tau_d}{2r} < \mu F_{2z} \quad (6)$$

である。ここで μ はネジ山とネジ穴の最大静止摩擦係数である。 F_{1y} と F_{2y} は同じ大きさであるが、逆向きのベクトルである。ネジの中心線から P_1 , P_2 に垂線を下ろし、これらの垂線とネジの中心線の交点 P_{1c} , P_{2c} とする。ネジの中心点上では締めつけトルク作用しないため、 $-F_{1y}$, $-F_{2y}$ のみが作用する。ネジの傾きがある場合これらが偶力として作用し、結果としてネジの回転軸の運動を生成する。回転軸の運動の角速度 ω_t はすべりがまったくないという仮定のもとでは

$$\omega_t = \frac{r_s \cos \theta_s}{r_h} \omega_d \quad (7)$$

として得られる。この回転軸の運動がネジ頭頂部とネジ締めドライバ先端の接点 P_d の回転運動となって現れ、コンプライアンス制御をしているマニピュレータの力センサに、ネジ締めドライバの回転と同期したトルクの発生を起こしていると考えられる。

次にコンプライアンス制御による影響を考える。2.1 節で述べたシステム構成に基づくコンプライアンス制御の周波数応答について述べる。 x_b 方向について考えると、センサで計測された力情報を入力し、手先位置の定常偏差を出力とする伝達関数 G_x は、近似的に式 (8) で表すことができる。

$$G_x = \frac{k_{fxx}}{s + k_{fxx}k_{sxx}} \quad (8)$$

ここで、 k_{fxx} , k_{sxx} はそれぞれ K_f , K_s の 1 行 1 列目の成分である。ここでこの伝達関数の折点周波数を求めると $11 [\text{rad/s}]$ であり、 $\omega_d = 14 \pi [\text{rad/s}]$ よりも低い周波数にあるため、回転の振動を打ち消す動作は生成できない。また、 y_b 方向も同様に考えることができる。Fig. 8にあるように、コンプライアンス制御によって上記の振動を低減する軌道が生成されているが、完全に打ち消していない。本論文では x_b , y_b 方向の力制御の目的は、ネジとネジ穴の軸を一致させるためであり、ネジ締め動作によって発生する振動に追従する動作は好ましくないため、このようなコンプライアンス制御のゲイン設定となっている。

最後に接触点ですべり状態であった場合ではどうなるかを考える。 F_d が 0 でない場合には、接触点の動摩擦係数を μ' として P_{1c} , P_{2c} にそれぞれ $\mu' F_{1z}$, $\mu' F_{2z}$ の力が作用する。ネジの回転軸周りの慣性モーメントは小さいので、大きな角加速度が発生し回転軸の運動が起こる。そして、直ちに固着状態に変化すると考えられる。

3.3 まとめ

本章ではネジ穴による拘束から考えられる幾何的な回転中心と、接触点での摩擦抵抗力の反力の作用点がずれることにより、ネジの回転軸の運動を発生させていることを説明した。人間がドライバを用いて実現するときは摩擦力を極力排除し、回転速度も一定ではないため、この現象はロボットマニピュレータによるネジ締め作業特有の現象である。

4. サポートベクターマシンによる異常検出

サンプルデータから判別に必要なパラメータを自動的に抽出する学習機能は異常検出アルゴリズムを実現する上で有用である。本論文では SMO 法による線形 SVM を異常検出に適用する。本章ではまず、SVM の有効性と、異常検出の手順について述べ、次に二つの特徴量を導入し、最後に異常判別率を示す。

4.1 異常検出手法の運用手順と SVM の有用性

ここでは工場などのロボットが稼動する現場において、異常検出のアルゴリズムの運用手順と SVM の有用性について述べる。ロボットの作業管理者は、故意にそれぞれの異常状態の環境を設定し、そのデータを取得する。これらと正常作業時のデータから特徴量を計算し、識別線を計算し、異常検出のシステムに用いる。

本論文では識別線を計算する手段として、線形 SVM を用いる。その理由を以下に述べる。

- (1) SVM のマージン最小化の原理によって少ないデータからでも、適切な識別線が得られることが期待できる。
- (2) 識別線の生成が半自動的に実行可能であるため、特別な知識がなくても運用可能である。
- (3) 識別空間の基底としての特徴量を、様々なデータに指定し、SVM を実行することで重要な特徴量の重みが自動的に大きくなり、必要な特徴量が理解できる。
- (4) 識別線を得るまでの計算量が比較的少ない。
- (5) 得られる識別線の効果が予測しやすい。

(1) はシステムの立ち上げ時にデータが少ない場合でも、異常検出アルゴリズムが実行可能であり、有用な機能である。(2) は工場の監視者が、最適化などの知識に詳しくない場合でも、運

用可能であることで波及するためには重要である。(3) に関して本論文では特徴量を二つに絞ったが、終了時の手先位置、作業時間など計測可能なデータの特徴量として実装することが可能である。各作業状態における特徴量の分布から、SVM が重要な特徴量に関して、識別線の重みの絶対値を高く設定するため、必要な特徴量が明確に理解できる。(4) はニューラルネットワークと比較して、識別線を得るための計算量が少なく、学習データを追加する場合に有用である。(5) は非線形 SVM などと比較して得られる線形の識別線は、人間でも理解しやすい形式であるため、特徴量の値から識別結果が予測しやすい。以上のような理由から、線形 SVM を用いた識別線の生成は、運用面において簡便でかつ有用な方法であるといえる。

ここで、本手法の運用上のデータ取得に関する問題点について述べる。一般的な製品には複数の種類のネジが用いられている。それらはネジの材質、ネジの挿入量、ネジ穴の土台の材質が異なることが予想される。本論文で提案している手法では、上記のネジの差異に対して正常状態と各異常状態の特徴量をすべて実験的に取得する必要がある。これは運用者にとって煩雑であり、今後に改善の必要がある。改善策としてはユーザが学習用データとして、特徴量の値を指定する方法が挙げられる。本論文で用いた特徴量である推定挿入量や挿入反力の最大値のように、好ましい値が予測可能であれば、例えば「推定挿入量が 12 [mm] かつ挿入反力の最大値が 10 [N] の場合は正常状態である」や「推定挿入量が 0 [mm] かつ挿入反力の最大値が 0 [N] の場合はネジ喪失状態である」と指定することも可能である。ただし、現在の手法では特徴量の一部だけを指定することや、不等式の条件を SVM を用いて識別線に組み入れることはできない。上記の改善策の簡易性と、認識精度への影響など弊害の確認は将来的な課題である。

4.2 異常検出手順

Fig. 14 に異常検出機能の手順を示す。まず、作業終了するまでのロボットの先位置と、力センサによって計測される力情報を取得する。次にそれらの時系列のデータから特徴量を抽出し、最後に異常検出を行う。線形 SVM 判別器はそれぞれの作業状態の組み合わせに対して用意される。本論文では四つの状態の組み合わせに対して六つの SVM 判別器が作られる。判別プロセスでは、**Fig. 15** に示すように、成功状態とそれぞれの異常状態に対する線形 SVM 判別器により判別が繰り返される。このとき一つでも異常状態と判別された場合は異常状態同士の判別器を用いて異常診断を行う。

4.3 特徴量

本論文では線形 SVM 判別器に二つの特徴量を用いる。一つはネジの推定挿入量であり、もう一つは最大挿入反力である。

まず、ネジの推定挿入量について説明する。ネジの推定挿入量はモーメントの振動をカウントすることにより計算する。**Fig. 16** に示すように、一定時間 Δt 内におけるセンサ座標系の z 軸周りのモーメント M_z の自己相関係数を計算し、これを C_{corr} とする。 Δt は式 (9) によって計算される。

$$\Delta t = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_d} \text{ [s]} \quad (9)$$

本来、 Δt はネジ頭頂部の回転運動の半周期であり、式 (7) に

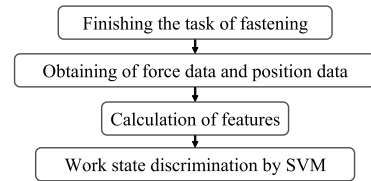


Fig. 14 Scheme of fault detection

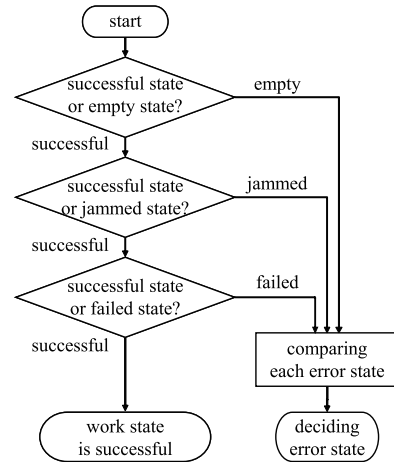


Fig. 15 Process of application of SVM

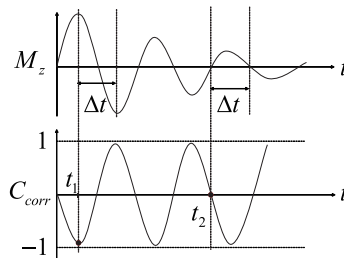


Fig. 16 Calculation example of coefficient of autocorrelation

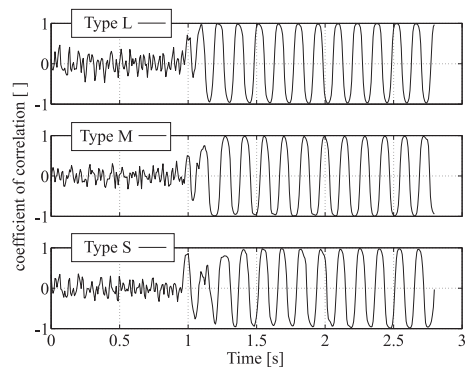


Fig. 17 Calculated coefficient of autocorrelation of the reaction torque around the z_m -axis

示す ω_t の半周期の長さであるが、正確に求めるのが困難であるため近似的に $\omega_t \approx \omega_d$ として、 ω_d の半周期の長さを用いている。 C_{corr} を計算することで次の効果が期待できる。

- (1) ネジ締め機の回転角速度よりも高周波のノイズが除去されたデータが取得できる。

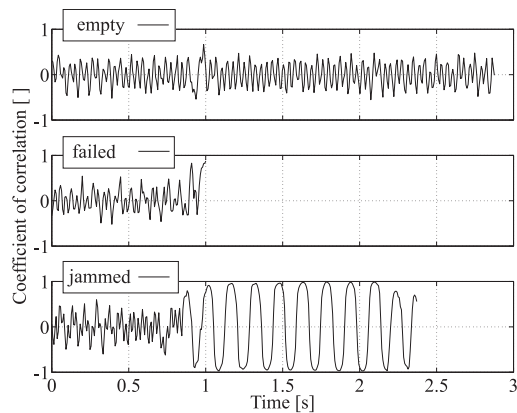


Fig. 18 Calculated coefficient of autocorrelation of the reaction torque around the z_m -axis for the empty, jammed and failed states

Table 2 Recognition rate of SVM for thread fastening task (10 times meanings)

evaluation data	recongition rate [%]			
	successful	empty	failed	jammed
successful state	99.6	0	0	0.4
empty state	0	100	0	0
failed state	0	0.8	98.0	1.2
jammed state	0.4	0	2.4	97.2

(2) 計測したトルクの大きさによらず, -1 から 1 までの値で正規化されたデータが取得できる.

Fig. 7 に対する C_{corr} のデータを Fig. 17 に示す. それぞれの成功状態のトルクに対して, トルクの大きさによらず振動の状態が取得できていることが分かる. また, Fig. 10 に対する C_{corr} のデータを Fig. 18 に示す. モーメントの振動ノイズによって好ましくない振動が C_{corr} にも現れていることが分かる. こ

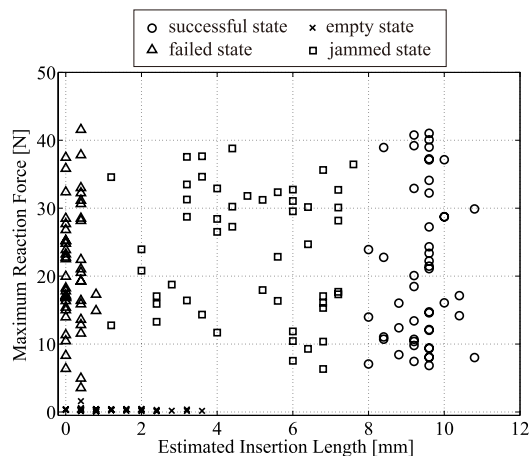


Fig. 19 Feature paramters for SVM discrimination

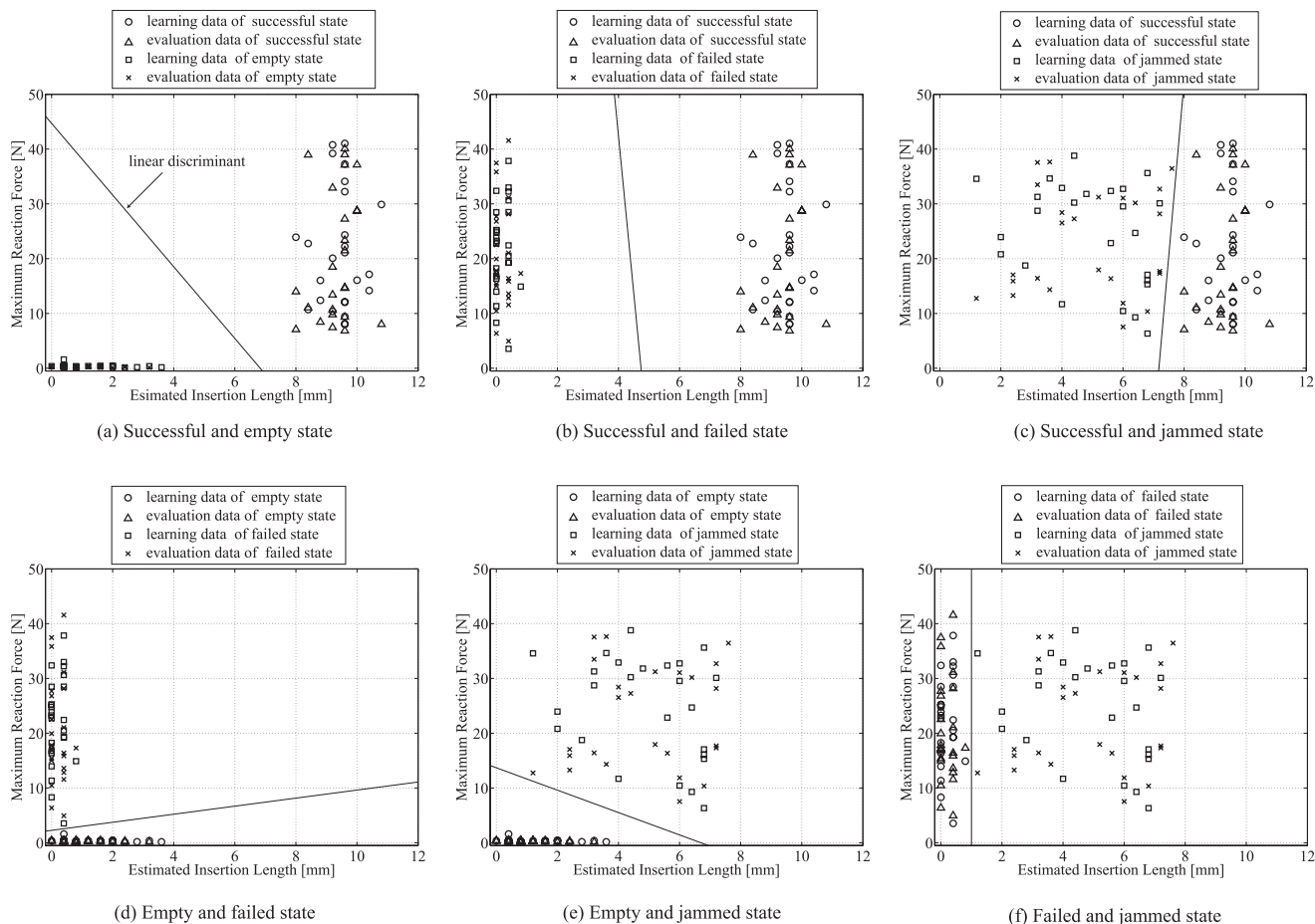


Fig. 20 Result of linear SVM discrimination

で N_{zc} を C_{corr} の有効ゼロクロスカウントとして定義する。まず、 C_{corr} が 0 をまたぐデータごとに分割し、それぞれの波形をチェックし、条件を充した波形の数をカウントする。チェックする条件は以下の二つである。

- (1) 波形データの長さは Δt の $\pm 10\%$ に入る。
- (2) それぞれの波形データの絶対値の最大値は C_{corr}^* 以上である。

本論文では C_{corr}^* を 0.5 に設定した。 N_{zc} を計算した後ネジの推定挿入量 \hat{l}_{ins} を式 (10) によって取得する

$$\hat{l}_{ins} = \frac{N_{zc}lp}{2} \quad (10)$$

もう一つの特徴量は最大挿入反力である。上記のようなアルゴリズムを用いても、力センサの計測ノイズにより、ネジ喪失状態において推定挿入量が 0 でない値をとる。そこでネジ喪失状態を判別しやすくするため、最大挿入反力の特徴量として用いる。

4.4 判別率実証テストの条件

提案した手法の有効性を検証するために判別率実証テストを実施した。それぞれの状態における 50 個のデータのうち、ランダムに選ばれた 25 個を SVM の教師データに用いて、残りの 25 個を評価用データに用いた。ネジつまり状態のデータは穴の深さ 5.4 [mm] の場合と 8.6 [mm] の場合をそれぞれ 25 回ずつ取得した。このテストを 10 回繰り返して判別率を求めた。

4.5 認識結果

10 回の実証テストにおける判別率の平均値を **Table 2** に示す。Table 2 の行は評価データの作業状態を示し、列は認識結果を示す。それぞれの状態の認識において、90%を超える高い認識率を得ることができた。ただし、Table 2 の四行一列めの値が 0.4%であるのには問題がある。これは、ネジつまり状態 (jammed) の作業結果を正常状態 (successful) と認識したという事象が起こりうることで実際の生産現場では不良品を見逃すことになり問題である。この認識率の改善は今後の課題である。

次に、**Fig. 19** に、実験データから計算した特徴量を示す。また、すべての認識が成功した場合のそれぞれの作業状態に対する線形 SVM 判別結果を **Fig. 20** に示す。二組の作業状態の特徴量および、線形 SVM 判別器によって生成された識別線を示す。六つの組み合わせに対して各状態を分けるように識別線が引かれていることが分かる。

5. ま と め

異常検出機能はロボットによる工場の自動化において有用な機能であり、様々な作業に応用することが望まれている。本論文ではネジ締め作業に注目し、ロボットによるネジ締め作業で発生する振動からネジの推定挿入量を計算することを提案した。

また、ネジの推定挿入量と最大挿入反力の特徴量とする SVM により異常検出を実現するアルゴリズムを提案した。最後に実験から得られたデータを基に判別率実証テストを実施し、90%を超える高い判別率が実現できることを確認した。

最後に今後の展望について述べる。本論文では、ネジ穴は十分な深さがあり、ネジ穴のベースはアルミ製で剛性の高い状態で実験を行った。今後は家電製品の組立にも応用できるように、ネジ穴の厚みが薄い場合や、ベースの剛性が低い場合においても有効であるか検証を行う必要がある。また、材料に関しても樹脂製のネジ、土台に対して対応可能かを検証することも今後の課題である。そして、非線形の識別線を用いた手法により、より頑健な異常検出アルゴリズムを実現することも有用であると考える。

謝 辞 本研究は NEDO プロジェクト「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」の一部として実施した。

参 考 文 献

- [1] J. Huang, T. Fukuda and T. Matsuno: "Model-Based Intelligent Fault Detection and Diagnosis for Mating Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.13 issue 1, pp.86-94, 2008.
- [2] J. Huang, P. Di, T. Fukuda and T. Matsuno: "Robust Model-based Online Fault Detection for Mating Process of Electric Connectors in Robotic Wiring Harness Assembly Systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol.18 issue 5, pp.1207-1215, 2010.
- [3] T. Matsuno, T. Fukuda and Y. Hasegawa: "Insertion of Long Peg into Tandem Shallow Hole Using Search Trajectory Generation without Force Feedback," Proc. of IEEE 2004 International Conference on Robotics and Automation, vol 2, pp.1123-1128, 2004.
- [4] M. Klingajay, L.D. Seneviratne and K. Althoefer: "Identification of threaded fastening parameters using the Newton Raphson Method," Proc. of 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2055-2060, 2003.
- [5] F. Mrad, Z. Gao and N. Dhayagude: "Fuzzy logic control of automated screw fastening," Proc. of 1995 Thirtieth Industry Applications Conference Annual Meeting, pp.1673-1680, 1995.
- [6] S. Pitipong, P. Pornjit and P. Watcharin: "An automated four-DOF robot screw fastening using visual servo," Proc. of 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, pp.379-385, 2010.
- [7] B.-R. Zuo, A. Stenzel and G. Seliger: "Flexible handling in disassembly with screw nail indentation," Proc. of 2000 International Conference on Robotics and Automation vol.4, pp.3681-3686, 2000.
- [8] N. Cristianini and J. Shawe-Taylor: サポートベクターマシン入門。共立出版, 2005.
- [9] 広瀬茂男, Craig Tibbetts, 萩原哲夫: "負荷応用型無段変速機 X-screw の開発", 日本機械学会論文集 C 編, vol.66, no.646, pp.1912-1918, 2000.



松野隆幸 (Takayuki Matsuno)

2004 年 9 月名古屋大学大学院工学研究科マイクロシステム工学専攻博士課程後期課程満期退学, 2004 年 10 月名古屋大学大学院工学研究科助手, 2005 年 3 月に学位を取得, 博士 (工学). 以降 2006 年 4 月より富山県立大学工学部助手, 助教, 講師, 2011 年 10 月より岡山大学大学院自然科学研究科講師に着任. ロボットによる柔軟物体のマニピュレーション, 組立作業の自動化に関する研究に従事. (日本ロボット学会正会員)



黄 劍 (Jian Huang)

Jian Huang received the B.S. degree in automatic control engineering in 1997, and the M.S. and Ph.D. degrees in control theory and control engineering from Huazhong University of Science and Technology (HUST), Hubei, China, in 2000 and 2005, respectively. He is an Associate Professor in the Department of Control Science and Engineering, HUST. His current research interests include robotic assembly, networked control systems, and bioinformatics.



白土浩司 (Koji Shiratsuchi)

2007 年 3 月京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻博士前期課程修了. 同年三菱電機株式会社入社. 同社において, ロボット制御およびロボット応用技術の研究開発に従事し, 主に干渉回避, 力覚制御応用, 物体ハンドリングなどの技術開発を担当. (日本ロボット学会正会員)



福田敏男 (Toshio Fukuda)

1977 年東京大学大学院博士課程修了, 博士 (工学). 現在名古屋大学大学院工学研究科教授, マイクロ・ナノメカトロニクス研究センター長. 自己組織化ロボット, マイクロ・ナノロボット等の研究に従事. IEEE Nanotechnology Council 会長 (2002~2005), IEEE Region 10 Director (2011~2012) 等を歴任. IEEE Robotics and Automation Technical Field Award (2010), 日本ロボット学会功労賞 (2010) 等, 多数受賞. IEEE フェロー (1995), 日本機械学会フェロー (2002) 等. (日本ロボット学会正会員・フェロー)