

3 ユニット型配電線移動ロボットの姿勢制御

Attitude Control of a Service Wire Mobile Robot Composed of 3-Units

○村山 和裕*, 武尾 文雄*, 加瀬 正人**, 高橋 康裕***, 佐藤 勝俊*

○Kazuhiro Murayama*, Fumio Takeo*, Masato Kakuchi**,
Yasuhiro Takahashi***, Katsutoshi Sato*

*八戸工業高等専門学校, **豊橋技術科学大学,
***富士通エイ・エム・ディ・セミコンダクタ

*Hachinohe National College of Technology, **Toyohashi University of Technology,
***Fujitsu AMD Semiconductor Co., ltd

キーワード: 架線移動ロボット(Wire Mobile Robot), 姿勢制御(Attitude Control),
外乱オブザーバ(Disturbance Observer)

連絡先: 〒039-11 八戸市田面木字上野平16-1 八戸工業高等専門学校 機械工学科
村山 和裕, Tel.:(0178)27-7270, Fax.:(0178)27-9379
E-mail:murayama-m@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

従来、配電線や電話線などの架線の保守点検作業は、膨大でしかも大きな危険を伴うにもかかわらず、高所作業車が入り込めない場所では、もっぱら人手に委ねられてきた。このため、これらの作業から作業者を解放する目的で、架線上を自律的に移動し、保守点検を自動的に行うロボットの開発が盛んに進められている。

このような保守点検ロボットに最低限要求される機能は、架線上に存在する碍子部などの障害物を回避することが可能であることで

ある。このため、これまでの研究は、こうした機能を有する移動機構の検討に主眼をおいたものがほとんどであり、様々なタイプの移動ロボットが提案されてきている。

これらのロボットを、障害物の回避方法に関して分類すると、まず、クローラなどを用いて、障害物の上面に直接接触しながら、それを乗り越えていくタイプ¹⁾が挙げられる。このタイプは、比較的大きな障害物でも、姿勢を安定に保ちながら回避することができるという利点を有しているが、高圧送電線の鉄塔のように、障害物が接触により破損する恐れのない場合に用途が限られ、筆者らが対象として想定している配電線には適さない。

一方、障害物の側方または下方を非接触で回避するタイプ^{2)~5)}は、配電線や電話線など一般の架線に広く適合するが、障害物の前後で車輪などの走行部の持ち換え動作が必要になるため、姿勢安定性の確保が難しいという欠点を持つ。特に、配電線上を移動するロボットの場合、耐張碍子部のように障害物が比較的大きく、しかも、直線状の架線ばかりか、屈曲路や分岐線への対応も求められるので、その難しさは一層増す。

このため、このような機能を有しているロボットは、これまでに提案されたロボットの中で、マルチユニット型ロボット³⁾しか存在しなかった。しかし、このロボットは、アクチュエータ数が非常に多いため、現実性に乏しい。また、このロボットを最適化し、姿勢バランス機構を設けた2ユニット型ロボット⁴⁾も、本来電話線を対象として考案されたものであるが、障害物回避動作を修正すれば、配電線への転用は可能である。しかし、この動作修正のために、設けられている姿勢バランス機構だけでは、姿勢安定性を十分に保つことができなくなってしまうという問題点が生じる。

これに対して、筆者らが提案している3ユニット型ロボット⁶⁾は、前述した配電線移動ロボットに要求される機能を全て満たすとともに、架線走行中、障害物回避中とを問わず、常時姿勢を安定に保つことができるようになっている。本ロボットの構造上の最大の特徴は、非駆動関節を設けていることである。架線移動ロボットに限らず、移動ロボット全般において非駆動関節を用いている例はほとんど見あたらないが、本ロボットでは、この非駆動関節の導入により、姿勢制御用の balan-

スを、それだけの役割にとどめず、障害物回避動作にまで積極的に活用できるようにして、結果としてアクチュエータ数の削減を達成している。

本研究では、この3ユニット型ロボットに関して、これまでに、簡単のため屈曲路や分岐線への移動機能を取り外した直線路専用タイプのロボットを試作し、外乱オブザーバ⁷⁾を用いた位置制御系をこれに適用して、動作確認を行ってきた。そして、一連の障害物回避動作及びロール軸周りの姿勢制御性については、既に良好な結果を得ている⁸⁾。本報告では、これまでの報告で触れられなかったピッチ軸周りの姿勢制御に関して、その制御方法と実験結果について報告する。

2. 3ユニット型の機構と動作

2.1 3ユニット型の機構

Fig. 1に、3ユニット型配電線移動ロボットの直線路専用タイプの模式図を示す。本ロボットは、中央のセンタユニットと前後2つ

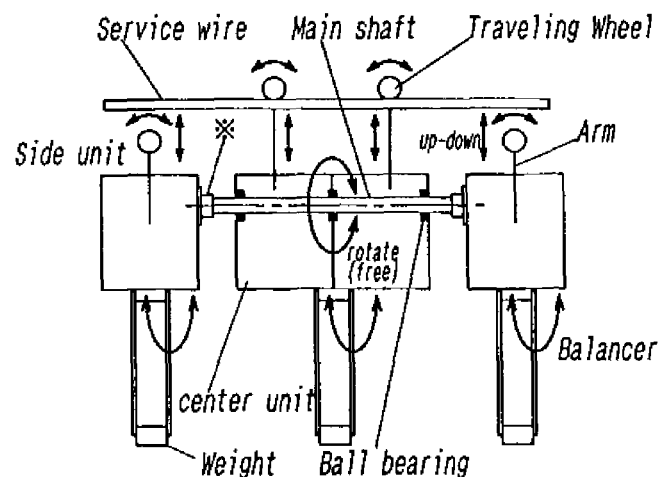


Fig. 1 Service wire mobile robot composed of 3-units

のサイドユニットとに大別される。2つのサイドユニットは、センタユニット中央部を前後に貫通する主軸の両端に固定されており、この主軸を玉軸受を介してセンタユニットが支持する構造となっている。このため、センタユニットとサイドユニットは、互いに主軸周りに自由に回転できる。一方、それぞれのユニットは、配電線を保持し走行する走行車輪、ユニット本体を懸架するアーム、そしてユニットのロール軸周りのバランスをとるバランスから構成されている。

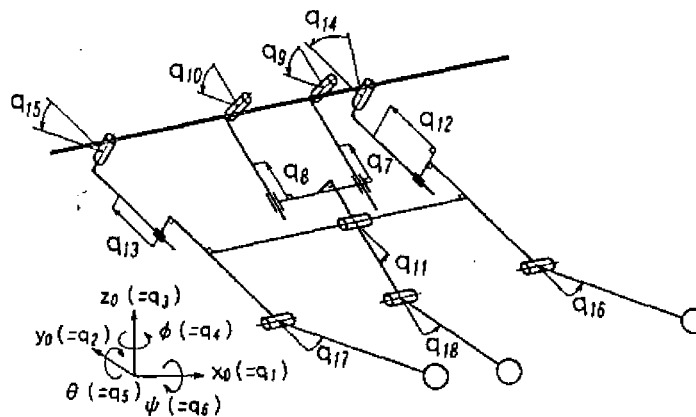


Fig. 2 18-links model

なお、図中に※印で示した主軸とサイドユニットとの連結部に、主軸に対してサイドユニットを水平面内で回転させる機構を設ければ、屈曲路や分岐線など非直線路での走行が可能となる。

Fig. 2は、本ロボットのリンクモデル図である。本研究では、センタユニットに固定したベース座標系の位置と姿勢を、絶対座標系により表すのに必要な6つの状態変数（位置 x_0 、 y_0 、 z_0 及びロール角 ϕ 、ピッチ角 θ 、ヨー角 ψ ）をも関節変位として取り扱う。このため、これらの仮想的な関節も含めて、本ロボットは計18個の関節から構成されている。

2. 2 3ユニット型の動作

Fig. 3に、本ロボットの基本動作の概念図を示す。サイドユニットのアームを縮め、センタユニットの走行車輪のみで配電線を保持している場合、サイドユニットは主軸周りに自由に回転できるようになっている(a)。この状態から、サイドユニットのバランスを振り出すと、重心位置の移動により、サイドユニットは傾斜する(b)。ここで、アームを伸ばし(c)、バランスを再び元の位置に戻せば(d)、サイドユニットの傾きは解消されるので、アームを縮めることにより、サイドユニットの走行車輪を配電線上に乗せることができる(e)。

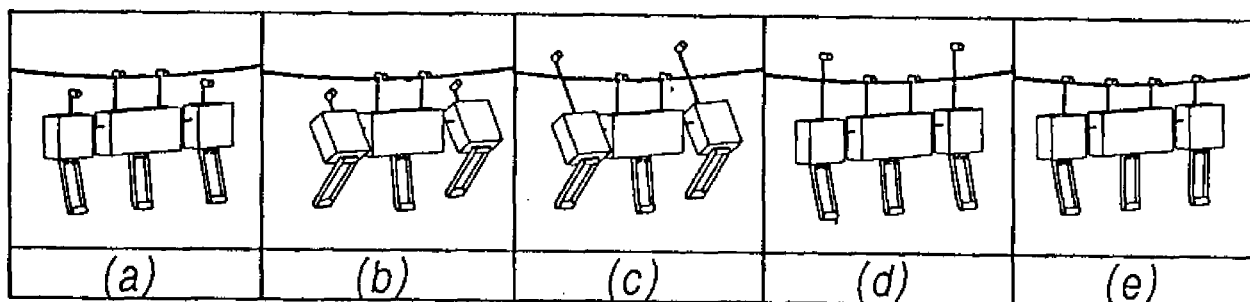


Fig. 3 Movement of the robot

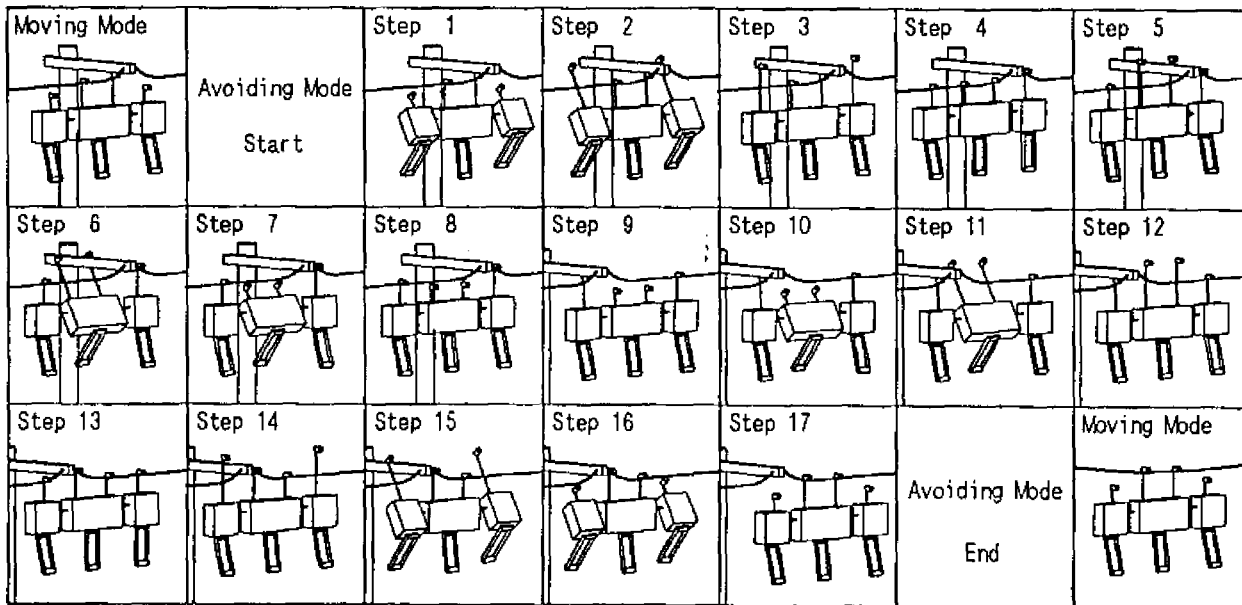


Fig. 4 Sequence of obstacle avoidance

この動作を逆にたどれば、配電線に乗っていた走行車輪を外すことができる。また、サイドユニットの走行車輪が配電線上に乗っている場合でも、同様の動作により、センタユニットの走行車輪の着脱が可能である。さらに、これらの動作を組み合わせれば、Fig. 4に示すように、電柱付近の障害物を回避することも可能となる。

2. 3 3ユニット型の利点

この一連の障害物回避動作において、配電線に走行車輪が拘束されているユニットのロール角は、そのユニットのバランサにより制御される。一方、非拘束ユニットの主軸周りの回転角も同様に、そのユニットのバランサにより制御されるが、拘束ユニット、非拘束ユニットそれぞれの姿勢制御は、主軸とセンタユニットとの間が非駆動関節となっているため、互いに干渉しない。このように、機構的に非干渉化を達成している点が、本ロボッ

トの最大の特徴である。

本ロボットでは、外乱に対して本体の姿勢を制御するために設けられているバランサの役割を、走行車輪の着脱動作にまで拡張し、結果としてアクチュエータ数の抑制を実現している。このようなことが可能となったのは、機構的な非干渉化に起因する姿勢制御の容易化によるところが大きい。

また、複数のユニットからなる架線移動ロボットでは、障害物回避動作中のあらゆる状態において適切な姿勢を保てるように、各ユニットの重心位置を設定しなければならないが、これは一般に大変な困難を伴う。これに対して、本ロボットでは、ピッチ平面に関しては、拘束状態が常時ほぼ対称的となるため、設計上さして配慮する必要はない。また、ロール平面に関しても、先に述べたように非干渉化構造になっているため、ユニット単体の重心位置だけを考えるだけでよく、設計は大幅に簡略化される。

以上のように、本ロボットの利点は、非駆動関節を設けたことによるところが大きい。

3. 外乱オブザーバを用いた制御系

本ロボットでは、配電線による拘束は厳密に言えば非ホロノミックであるが、配電線と走行車輪との間に配電線軸方向の滑りがなく、また、配電線と走行車輪との接触点上における走行車輪の周速度の向きが電線軸と平行であれば、拘束はホロノミックと見なせる。これらの条件の仮定は、現実的に十分許される範囲内にあるので、これらの条件が成立しているものと仮定して、 m 個の拘束条件式を求め、それらを、

$$e(q) = 0 \in R^m \quad (1)$$

と表せば、

$$E = \frac{\partial e(q)}{\partial q} \in R^{m \times n} \quad (2)$$

を用いて、拘束のある場合の運動方程式は、

$$M\ddot{q} + h + g + T_{dis} = K_t I + E^T f \quad (3)$$

と表すことができる。ここで、

M : 慣性行列 $\in R^{n \times n}$

q : 関節変位ベクトル $\in R^n$

h : 遠心力、コリオリ力項 $\in R^n$

g : 重力項 $\in R^n$

T_{dis} : 外乱トルク行列 $\in R^n$

K_t : モータのトルク定数ベクトル

I : モータの駆動電流ベクトル $\in R^n$

f : 拘束力ベクトル $\in R^m$

この運動方程式 (3) から拘束力ベクトル f を消去すれば、

$$\ddot{q} = A(K_t I - h - g - T_{dis}) - M^{-1} E^T (E M^{-1} E^T)^{-1} \dot{E} \dot{q} \quad (4)$$

を得る⁹⁾。ここで、

$$A = M^{-1} - M^{-1} E^T (E M^{-1} E^T)^{-1} E M^{-1} \quad (5)$$

この式 (4) において、関節速度や、重力に依拠する項を、外乱トルクベクトル T_{dis} に

含めて考えれば、

$$\ddot{q} = A(K_t I - T_{dis}) \quad (6)$$

ここで、 A を適当な関節変位 q 近傍で線形化したノミナルモデル A_n のモデル化誤差分まで T_{dis} に含めて考えた上で、 T_{dis} を電流次元に直して、これを I_{dis} とおけば、

$$\ddot{q} = A_n K_t (I - I_{dis}) = P_i (I - I_{dis}) \quad (7)$$

さて、この線形化された運動方程式 (7) において、サンプリング毎の演算時間を短縮するため、相互慣性力項まで電流次元外乱ベクトル I_{dis} に含めて考える大西の手法⁷⁾ を適用すれば、

$$\ddot{q}_i = P_{dis} (I_i - I_{dis}) \quad (8)$$

しかし、本ロボットでは、2. 3節で述べたように、バランスに作用する関節駆動力が、自らの関節の変位ではなく、バランスが設置されているユニットのロール角を直接制御する場合がある。そこで、本研究では、関節変位 q_i を関節 i に設置されたモータで駆動する場合、関節 j 以外の関節に設置されたモータによる干渉の影響を、電流次元外乱ベクトル I_{dis} に含めて考えることにして、

$$\ddot{q}_i = P_{dis} (I_j - I_{dis}) \quad (9)$$

としている。この式 (9) に基づいて、外乱オブザーバ⁷⁾ を用いた位置制御系を構成すると、Fig. 5 のようになる。

なお、本ロボットでは、センタユニットの走行車輪が拘束される相と、サイドユニットのそれが拘束される相とがある。このため、相に応じて式 (9) 中のノミナル値 P_{dis} を変化させなければならないが、相切り替え時に、ノミナル値を瞬間的に変更させた場合、その影響によって外乱推定値が急変し、各関節が暴走してしまう。そこで、本研究では、常時

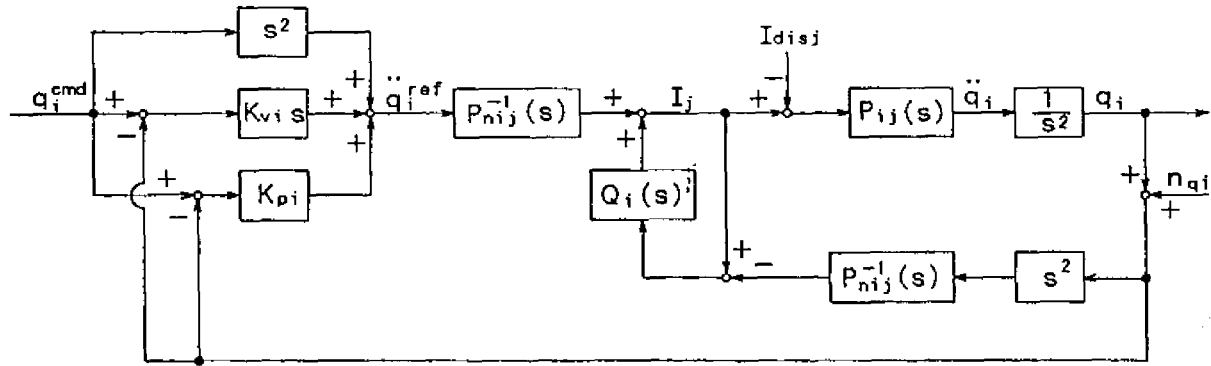


Fig. 5 Block diagram of position controller based on disturbance observer

2つの相それぞれのノミナル値を用いて外乱推定値を算出し続けるようにしておき、相切り替え時に、ノミナル値だけでなく、外乱推定値も併せて切り替えるようにしている。

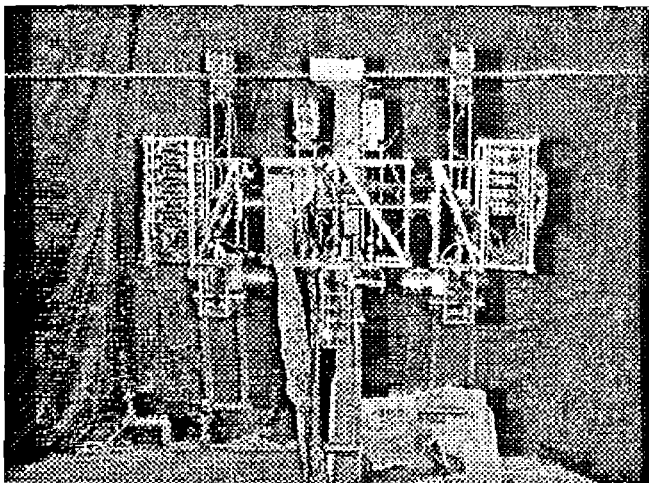


Fig. 6 Experimental model

4. 試作ロボットと制御システム

Fig. 6に試作ロボットの外観、Fig. 7に制御システムの構成をそれぞれ示す。

このロボットは、前報で報告したロボット⁶⁾⁸⁾に対して、後述するピッチ軸周りの姿勢制御を可能とするように、アーム部のストロークを100mmから200mmにまで増やしたもので、総質量は39kgである。また、通常の走行状態において全長1.15m、全高1.29m、全幅0.263mであり、配電線軸方向に約0.2mの障害物を回避することが可能である。

関節変位を計測するセンサには、関節5~6(センタユニットのピッチ角及びロール角)では合成姿勢角センサ、関節7~18ではロータリエンコーダを用いている。この合成姿勢角センサは、応答性は良好なもの原点安定性が悪いジャイロと、安定した原点を有するが応答性に劣る傾斜角計の出力信号を合成することにより、両者の長所をいかした姿勢角情報を得ようとして考案されたものであり、本ロボットでは、この出力信号の合成に、減算型フィルタを用いた手法¹⁰⁾を採用している。

本ロボットでこれまで使用してきた積分器

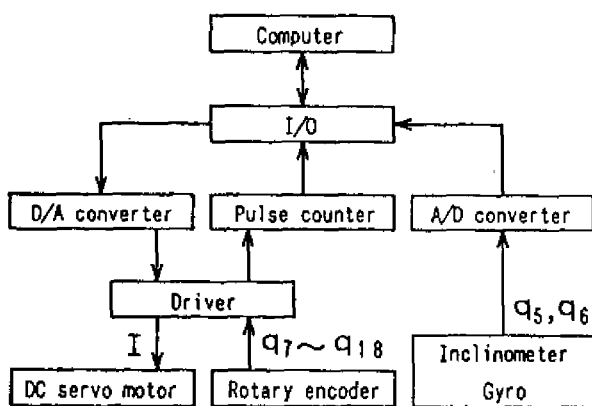


Fig. 7 Schematic of control system

内蔵型レートジャイロは、応答性周波数こそ3Hzと低い、ジャイロとしては原点安定性が比較的良好なものであった。しかし、それでも、原点の不安定性に起因して、制御中常にピッチ軸及びロール軸周りに微小な振動が発生していた。これに対して、傾斜角計と組み合わせて合成姿勢角センサとしたところ、こうした振動が大幅に抑制されたばかりか、姿勢角制御のフィードバックゲインも大きめにとることができるようになり、結果として姿勢制御性の向上につながっている。

5. ピッチ角制御

5. 1 走行時

本研究では、それぞれのステップにおける各関節変位の収束目標値はあらかじめ設定されているので、各ステップの開始時に、現在の位置と収束目標値との間に台形速度パターンを有する目標軌道を生成し、時々刻々関節変位、速度、加速度の目標値を与え続けるよ

うにしている。しかし、配電線のたわみ具合は未知であるため、センタユニットのピッチ角 q_s を制御する拘束ユニットのアーム部については、ピッチ角 q_s の計測値に基づいて、以下に述べる方法により、目標値を与えるようにしている。

いま、センタユニットが拘束されていて、Fig. 8 (a)に示す状態にあるものとするれば、

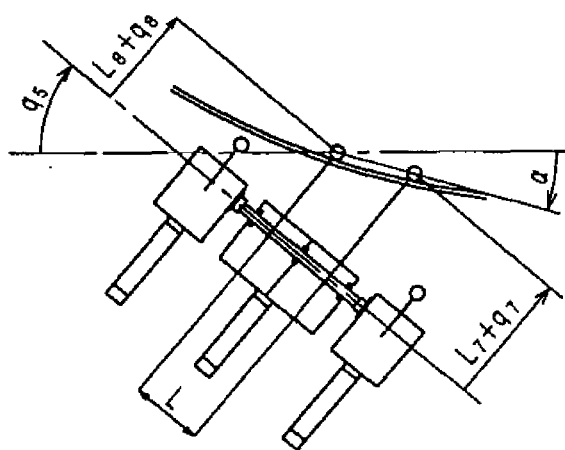
$$\tan(q_s - \alpha) = \frac{(q_r + L_r) - (q_s + L_s)}{L} \quad (10)$$

ここで、 α は2つの走行車輪の軸中心を結んだ直線と水平軸とがなす角であり、センタユニットのアーム部関節変位 q_r 及び q_s は、 $\alpha = 0$ かつ $q_s = 0$ のときに $q_r = q_s = 0$ となるよう定義されているものとする。

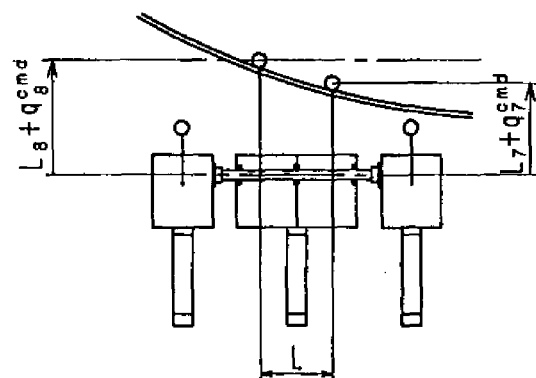
一方、走行車輪の有効径が L_r や L_s に比べて十分小さいものとするれば、ピッチ角 q_s を0とするような目標状態は(b)のように表すことができるから、 α は、アーム部の関節変位の目標値 q_r 及び q_s を用いて、

$$\tan \alpha = - \frac{(q_r^{cmd} + L_r) - (q_s^{cmd} + L_s)}{L} \quad (11)$$

ここで、 $q_s - \theta$ 及び θ が十分小さいものと



(a) A present condition



(b) An objective condition

Fig. 8 A present condition and an objective condition on the pitch plane

見なすとともに、 L_1 と L_2 が等しいものとして両式を連立させ、さらに目標値を、

$$q_7^{cmd} = -q_8^{cmd} \quad (12)$$

という形で与えることにすれば、

$$q_7^{cmd} = \frac{-Lq_5 + (q_7 - q_8)}{2} \quad (13)$$

となる。以上はセンタユニットが拘束されている場合のものであるが、サイドユニット拘束時の目標値も、同様の手法により算出する。

Fig. 9は、たわみの大きい模擬架線を走行させた実験の結果である。この模擬架線は、3.5mの間隔で設置した模擬電柱の間に0.16mの高低差をつけて直径22mmの炭素鋼丸棒を渡したものである（平均傾斜角 2.6deg.）。図中に示したピッチ角は、合成姿勢角センサの出力に、ジャイロの応答周波数である3Hzのローパスフィルタをかけたものであるが、ピッチ角制御を行わず、

$$q_7 = q_8 = 0 \quad (14)$$

とした場合に、ピッチ角の振れ幅が5deg.程度に達しているのに比べると、上述した目標値を与えた場合は、振れ幅が大幅に抑制されており、本制御方法が有効であることが確認できる。

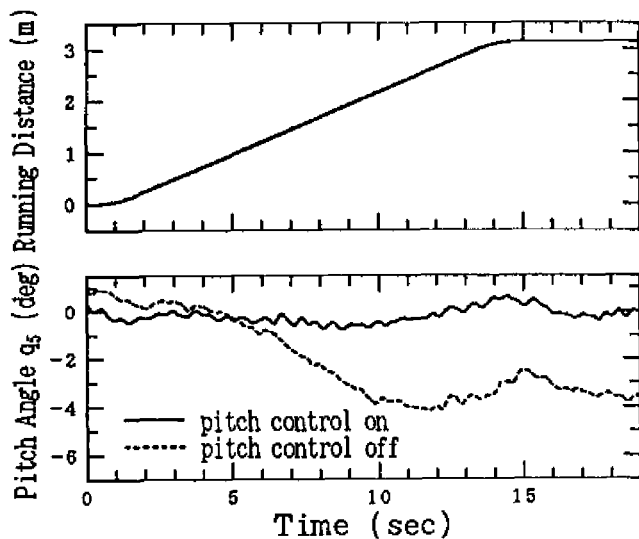


Fig. 9 Experimental result on moving mode

なお、減速時にピッチ角が大きく変動しているのは、模擬架線自体の揺れにもよるが、主として、合成姿勢角センサの低周波側を担当する傾斜角計が線加速度の影響を受けやすいことによるものである。

5. 2 走行車輪持ち換え時

Fig. 3 (d)から(e)への動作のように、非拘束ユニットの走行車輪を下降させて配電線上に乗せる場合に問題となるのが、アームをどこまで縮めるのかということである。最も簡単なのは、走行車輪と配電線とのクリアランスを超音波センサなどの非接触型の距離計により計測し、その分だけアームを縮める方法である。また、アーム部に力センサを設置し、荷重の変化から接触を判定してアーム部の動きを停止させる方法なども考えられるが、いずれの方法もコストや重量の増大を招く。そこで、本研究では、外乱オブザーバから出力される外乱推定値の変化から接触を判定する方法をとっている。

Fig. 10は、たわみ角約4deg.の模擬架線において、Fig. 3 (d)の状態から、サイドユニットのアーム部の関節変位 q_{12} 、 q_{13} を+50mmから-35mmまで変化させて、持ち換え動作を行った場合の実験結果である。この実験では、約2秒経過後、前側サイドユニットの走行車輪が接触して、センタユニット前側の車輪が浮いている。そして、さらにその約3.5秒後に、センタユニット後ろ側の車輪から、後ろ側サイドユニットのそれへと、拘束車輪が切り替わっているが、その様子は電流次元外乱推定値からもうかがい知ることがで

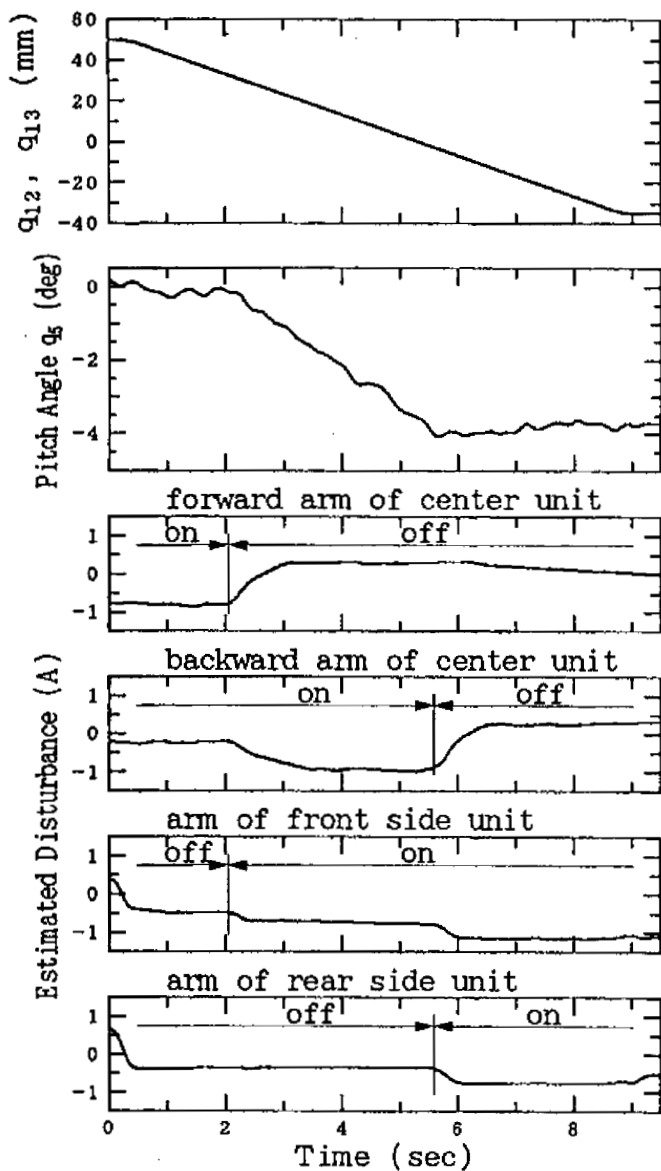


Fig. 10 Experimental result without touch judgement

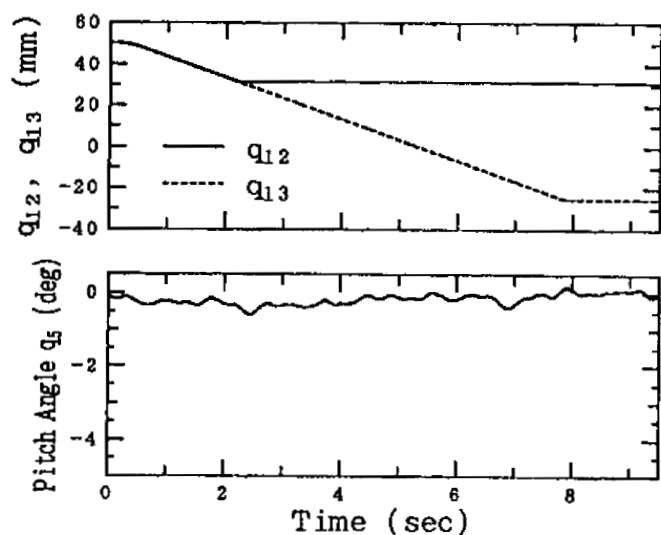


Fig. 11 Experimental result with touch judgement

きる。すなわち、配電線上に車輪が乗ると、アームだけでなく、ロボット本体の重量もアーム部に外乱として作用するようになるため、外乱推定値はマイナス側に大きく変化している。一方、車輪が配電線上から離れた際は、その逆の傾向を示しているが、この外乱推定値の変化は明瞭であり、この外乱推定値を、接触判定に用いることは可能と思われる。

そこで、本研究では、アーム部の外乱推定値が所定の敷居値を下回った瞬間、そのアームの走行車輪が配電線に接触したものと判断し、アーム部の動作を停止させるようにすることにした。その結果をFig. 11に示すが、先の実験と同じたわみ角が約4 deg. の模擬架線上での実験にもかかわらず、ピッチ角の変動はごくわずかにとどまっている。

6. おわりに

これまでに提案された様々な架線移動ロボットに比べて、姿勢安定性に優れる3ユニット型配電線移動ロボットにおいて、ピッチ軸周りの姿勢制御性について調べた。その結果、外乱オブザーバを用いた制御則に提案した手法を組みこむことにより、良好な結果が得られることを、実験により明らかにすることができた。

謝辞

減算型フィルタについて御教示いただいた東北大学教授江村超先生、同大学大学院生熊谷正朗氏、本報告をまとめるにあたり御協力いただいた八戸高専機械工学科学生

須藤康成君、葛西裕平君に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 樋口, 前田, 津谷, 萩原: 送電線巡視点検用鉄塔乗越え移動機構の開発, 日本ロボット学会誌, 9-4, 457/463(1991)
- 2) 辻村, 青島, 山田: 懸垂走行機構の軌跡制御の検討, 第5回日本ロボット学会学術講演会予講集, 519/520(1987)
- 3) 青島, 辻村, 山田: 障害物回避が可能な架線移動ロボット, 第5回日本ロボット学会学術講演会予講集, 521/522(1987)
- 4) 青島, 辻村, 藪田: マルチユニット型架線移動ロボットの障害物回避と分岐線移動法, 日本機械学会論文集, C, 56-530, 2649/2657(1990)
- 5) 佐藤, 石川, 浅利, 田村, 岡野: メンテナンス作業における作業移動型ロボット, 日本ロボット学会誌, 13-7, 928/931(1995)
- 6) 武尾, 村山, 小泉, 熊谷, IDRIS, 佐藤, 土屋, 音道: 3ユニット型配電線移動ロボットの開発(機構の提案と直線路専用タイプの試作), 日本機械学会講演論文集, No. 961-2, 288/290(1996)
- 7) 大西: 外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, 11-4, 486/493(1993)
- 8) 村山, 武尾, 橋本, 村井, 佐藤: 3ユニット型配電線移動ロボットの開発(直線路専用タイプの動的制御), 日本機械学会講演論文集, No. 961-2, 291/293(1996)
- 9) 木村, 下山, 三浦: 四足歩行ロボットの力学的解析, 日本ロボット学会誌, 6-5, 367/378(1988)
- 10) 江村, 熊谷, 小川, 郷古: 移動ロボット用姿勢センサのマルチセンサ法による特性向上, 第5回ロボットセンサシンポジウム資料, 33/38(1996)