

多関節ロボットの自律分散制御の研究

大西 公平

慶應義塾大学理工学部 助教授

1. はじめに

産業用ロボットの生産量と応用技術の面では、日本が最も進んでいることは衆目の一致するところである。しかし、ロボットに人間と似た動作を行わせるには、現在の産業用ロボットの性能は満足ではないことも周知の事実である。ところが、遅かれ早かれ高機能を有するヒューマノイドロボットが必要になることは社会情勢の然らしめるところであろう。機構的にみて現在のロボットが不満足である大きな理由は運動の自由度が足りないからである。将来のヒューマノイドロボットにおいて運動の自由度を生物なみに大幅に増やすためには次の2点を解決する必要がある。

- 1) 多数の運動の自由度の制御方法の確立。
- 2) ひとつの運動の自由度は一つ以上の独立したアクチュエータで駆動されなければならないので、限られた空間内に多数のアクチュエータを収容する必要がある。そのようなアクチュエータ技術の確立。

この2点の問題を解決するロボットは機能的には自律分散システムでなければ実現が不可能である。本論文はこのような多自由度の運動機能を持つ多関節ロボットの自律分散制御の基本性能を明らかにすることを目的とする。

2. 一自由度の関節運動の解析

自律分散制御の最大の目的はロボットの運動の制御の頑健さ（ロバストネス）を向上することである。図1のように、アクチュエータのトルク定数を K_t とし、慣性体に外部から印加されるトルクを T_{int} 、 T_{ext} 、 F の和で示す。 T_{int} は多自由度系において、他自由度から受ける干渉力（即ち相互慣性力項、コリオリ力項及び重力項の和）と自己速度の二乗の項を持つ求心力との和である。 T_{ext} はこの多リンク系が接触運動を行うときに対象から受ける反作用力で、力制御を行うと

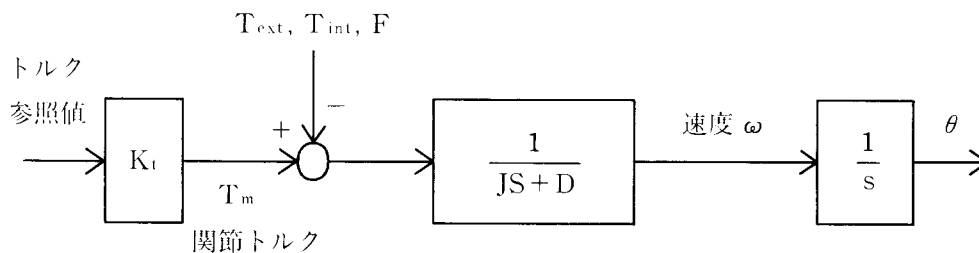


図1 ロボットの関節モデル

きの出力制御量である。Fは粘性項以外の摩擦項である。また、自己慣性J、粘性係数D及びトルク定数 K_t はパラメータ変動を起こすものとする。このような外乱とパラメータ変動の総和を外乱トルクとして定義する。

加速度とトルク電流指令値を用いて図2のブロック内の計算を行うと、この外乱トルク T_{dis} が

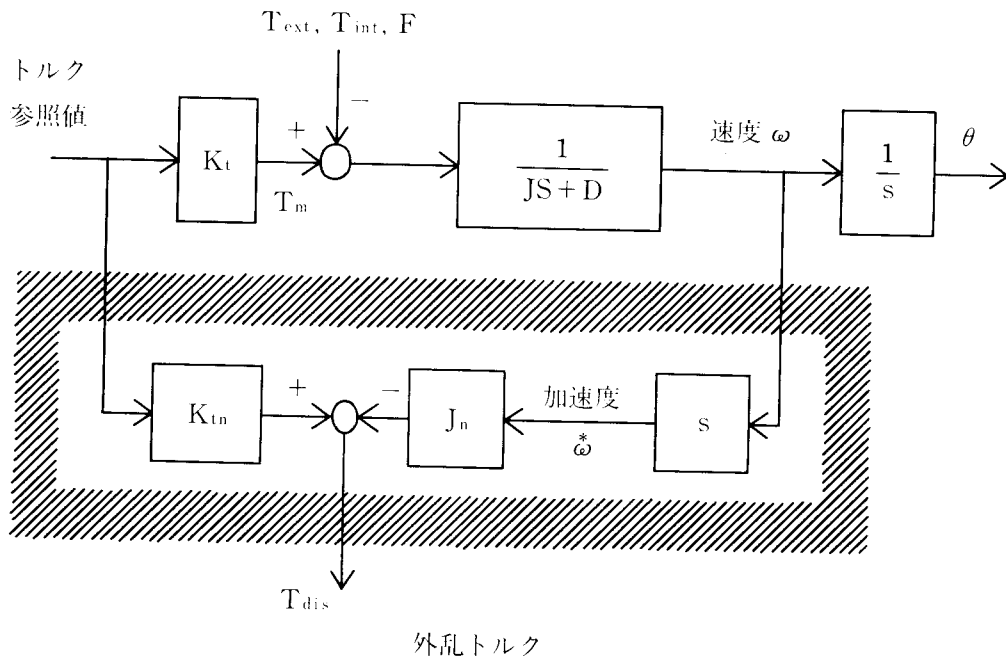


図2 外乱トルクの算出

簡単に得られる。自律分散制御はこの外乱トルクの影響がなくなるように各自由度においてキャンセル機能をもつことで実現できるので、図2で得られた外乱トルクをフィードバックしてその性能を明らかにする。外乱トルクを直接フィードバックして、前置利得を置きブロック等価変換を行うと、最終的に図3を得る。この系は外乱トルクから出力までの伝達関数が零となりサーボ

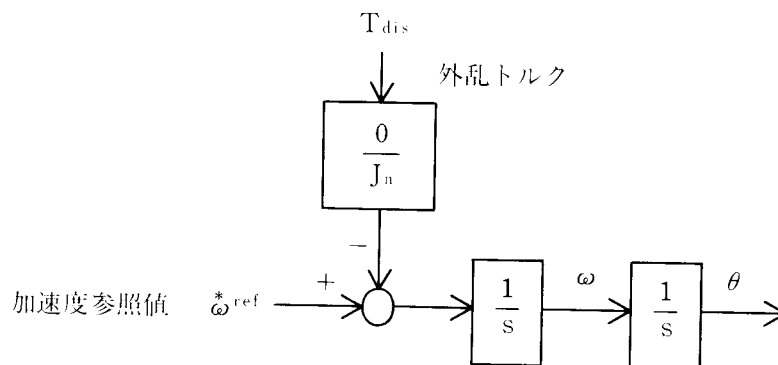


図3 加速度指令形関節制御系（加速度コントローラ）

剛性が無限大である。また、図3には示していないが自己慣性、トルク定数はともにその公称値に固定化されロバストネスが極めて高い系になる。図3ではダイナミクスは積分器2個のみとなり、入力はその自由度における加速度となっている。すなわち、多自由度ロボットの自律分散制御は加速度入力に追従する加速度コントローラであることが明らかになった。

各関節において加速度コントローラを実現するためにはその関節の加速度が必要である。一般には速度検出の方がはるかに容易なので微分して加速度を得ようとすれば、高周波領域でS/N比が悪化する。それを防止するため低周波通過フィルタを挿入し、図4を得る。ここでは詳細は省略するが、外乱トルクを未知の短冊状の階段関数で表される状態変数として扱うことで、これを

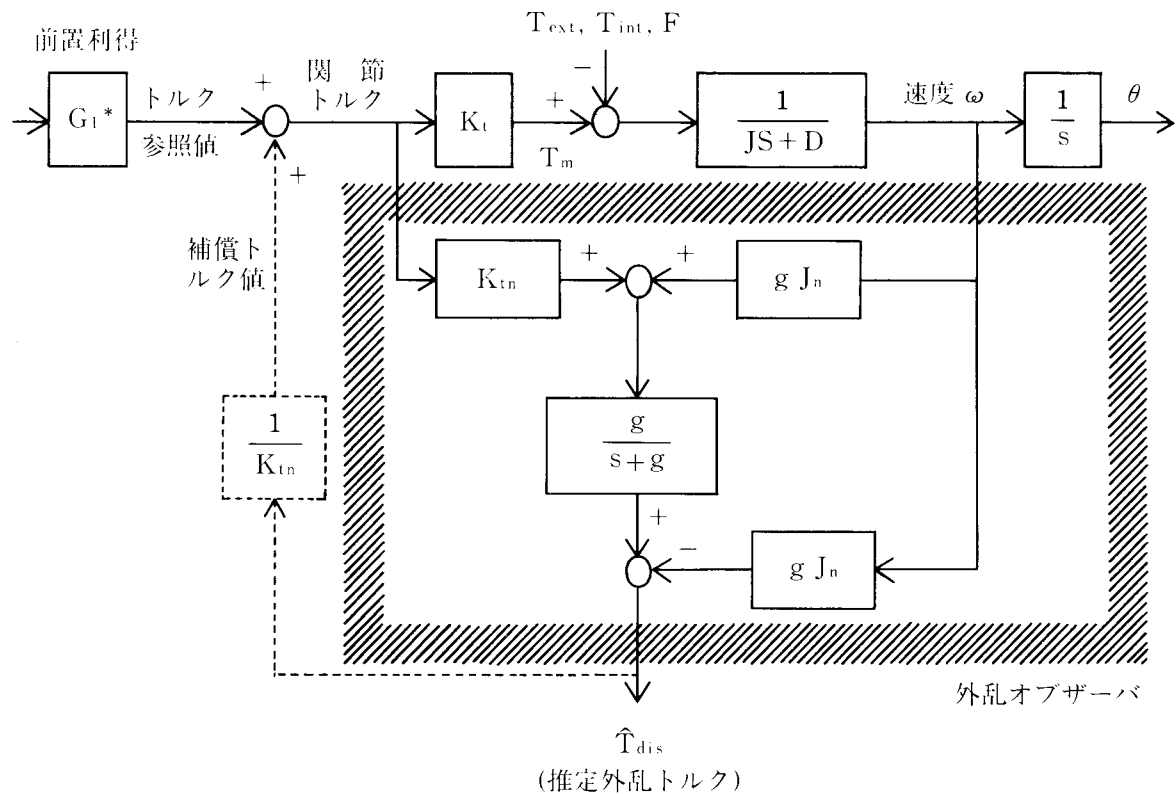


図4 外乱トルク推定とそのフィードバック（破線部）

同定する最小次元の線形状態観測器が設計でき、結果は図4と全く同等となる。図4から外乱トルクの推定が1次遅れとなることが示される。外乱トルクの2階微分を零にする近似、即ち折れ線近似をすれば2次遅れ系が得られる。同様に外乱トルクのn階微分近似を行うとn次系となる。このように状態観測器の次数を上げていけば外乱の近似度はそれだけ上がっていく。この結果は外乱トルクを推定するという意味で、外乱オブザーバとよばれる。推定される外乱トルクはどのようになるかを示したのが表1である。次数nと各係数giは設計の任意性に任される。

推定された外乱トルクをフィードバックすれば図3に対応して図5を得る。図5は外乱トルク

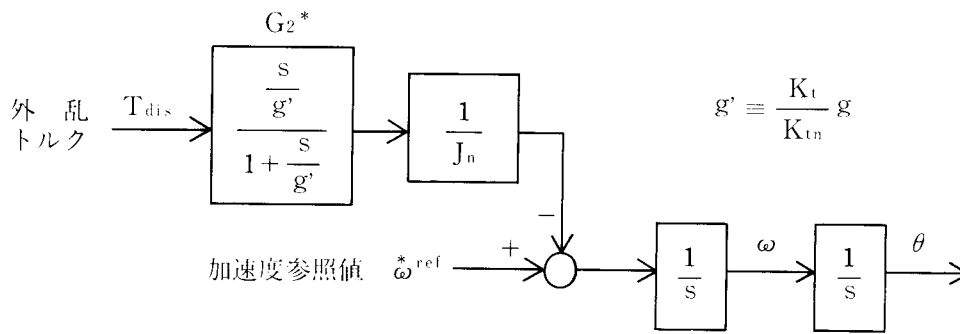


図5 推定外乱トルクフィードバック系における加速度コントローラ

の影響は零でなくなり、高周波通過フィルタ $G_2^*(s)$ を通してその影響を受けることを示す。周波数領域でこの $G_2^*(j\omega)$ の利得特性を示すと図6を得る。即ち遮断周波数 g より低い外乱トルク成分は系に影響を与えず抑圧されることを示している。前置利得を置いて、全前向き利得を1にすれば図3に対応する加速度コントローラとなる。ただし、外乱トルクの影響を高周波領域で受けることになる。外乱トルクはパラメータ変動と負荷の両方を含むので、 $G_2^*(s)$ は外乱トルクの抑圧の度合を表す感度関数となる。1から感度関数を引いたものが相補感度関数であり、観測雑音に関するロバスト性を表す。表1、図5及び図6は外乱トルク推定過程、外乱抑圧効果及び

表1 外乱トルク推定過程とフィードバック系の感度関数

伝達関数	$G_2^*(s)$ $G_2^*(s)$: 感度関数	$\hat{T}_{dis} = [1 - G_2^*(s)]T_{dis}$ $1 - G_2^*(s)$: 相補感度関数
1次系	$\frac{s}{s + g_1}$	$\hat{T}_{dis} = \frac{g_1}{s + g_1} T_{dis}$
2次系	$\frac{s^2}{s^2 + g_1 s + g_2}$	$\hat{T}_{dis} = \frac{g_1 s + g_2}{s^2 + g_1 s + g_2} T_{dis}$
.
n次系	$\frac{s^n}{s^n + g_1 s^{n-1} + g_2 s^{n-2} + \dots + g_n}$	$\hat{T}_{dis} = \frac{g_1 s^{n-1} + g_2 s^{n-2} + \dots + g_n}{s^n + g_1 s^{n-1} + g_2 s^{n-2} + \dots + g_n} T_{dis}$

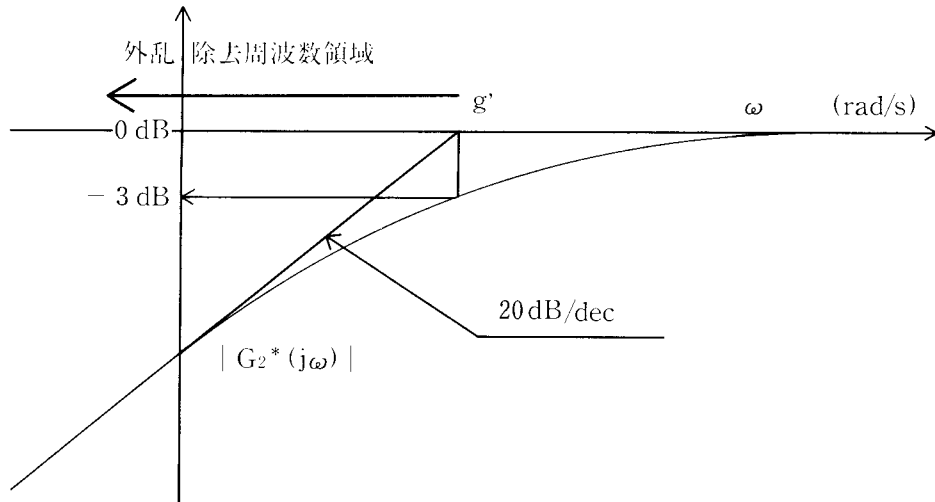


図6 高周波通過フィルタ $G_2^*(j\omega)$ (=感度関数) の利得特性

センサ雑音に対する制御系の安定性のトレードオフの関係を示している。従って、表1で示す次数 n と係数 g_i を設計するときには上記関係を把握して設計する必要がある。

3. 多関節ロボットの自律分散制御

前節の結果を多自由度マニピュレータに適用する。各関節に自律分散制御を適用し加速度コントローラにした場合を多自由度ロボットの動力学方程式より解析する。得られる結果は次式となる。

$$\ddot{q} = \ddot{q}^{ref} - P$$

$$P \equiv J_n^{-1} G_2(s) T_{dis}$$

ただし、 q は各関節角度をその成分に持つ関節角度ベクトル（関節座標ベクトル）である。上添え字 ref は参照値を示す。また、 J_n は各関節の公称慣性値をその成分に持つ対角慣性行列、 $G_2(s)$ は感度関数をその成分に持つ対角感度行列、 T_{dis} は外乱トルクをその成分に持つ対角外乱トルク行列である。従って、 P は加速度の次元となるので、これを等価外乱加速度ベクトルとよぶ。上式は各関節の角加速度参照値と実際の角加速度の誤差方程式が P で表されることを示している。

運動学（キネマティクス）を用いると作業座標での解析が可能である。分解加速度法でも用いられているように、キネマティクスから関節加速度ベクトルが作業座標加速度ベクトルより計算できる。得られた関節加速度参照値から作業座標における加速度誤差が次式で求まる。

$$\ddot{X}^{ref} - \ddot{X} = J_{aco} P$$

左辺は作業座標加速度誤差を表しているので右辺より等価外乱加速度ベクトルをヤコビ行列で各座標軸に分配することでその誤差が求まることが分かる。このように誤差が明快に評価できるのが自律分散制御の特徴である。加速度コントローラを組み合わせた多自由度運動の制御法を加

速度追従法 (Acceleration Tracing Orientation Method: ATOM) と呼ぶ。一例として多自由度ロボットの CP 制御に ATOM を適用した場合の位置誤差評価式は位置フィードバック (フィードバック係数行列は K_2) 速度フィードバック (フィードバック係数行列は K_1) 及び加速度指令値を用いて次式で求まる。

$$(s^2 + K_1 s + K_2) (X^{cmd} - X) = J_{acc} P$$

等価外乱加速度は感度関数の中に含むので上記誤差はかならず零に収束する。以上より、自律分散制御において多自由度ロボットの各関節で定義される外乱トルクと関節制御系で任意に設計できる感度関数を組み合わせることで等価外乱加速度ベクトルが導かれ、キネマティクスより導かれるヤコビ行列と組み合わせることで誤差の評価が可能となることが示された。

4. おわりに

本研究では更に上記自律分散制御の研究を実験的に検証するために様々な実験を行ったが本稿では省略する。詳細は参考文献を参照されたい。尚、本研究の成果は更にマイクロアクチュエータと組み合わせて人工筋肉の制御に発展できるものと期待している。そのときはじめてヒューマノイドロボットの夢が実際のものになるのではないかと思われる。

高柳先生及び財団からご援助頂いた研究助成は上記の実証実験に有効に活用させて頂いた。衷心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) M. Nakao and K. Ohnishi: "A Robust Decentralized Joint Control Based on Interference Estimation", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation Proc. p. 326 (1987)
- (2) S. Komada, S. Inadama and K. Ohnishi: "Bilateral Robot Hand Based on Estimated Force Feedback", IEEE Industrial Electronics Soc. Conf. Proc., p.602 (1987)
- (3) K. Ohishi and K. Ohnishi: "Adaptive DC Servo Drive Control Taking Force Disturbance Suppression Into Account", IEEE Trans. on Ind. Appl. vol. IA-21 No.1 (1988)
- (4) 中尾真人、金文煥、大西公平:「デジタルサーボ系のwindアップ現象の防止」、電学論 108 卷D-7号 (1988)
- (5) S. Komada, M. Morise and K. Ohnishi: "Robust Force and Compliance Control of Robotic Manipulator", IEEE Industrial Electronics Soc. Conf. Proc., p. 20 (1988)
- (6) T. Hoshinaka and K. Ohnishi: "Fast Motion Control of Mechanical Manipulator for Path Tracking", IEEE Industrial Electronics Soc. Conf. Proc., p. 163 (1988)
- (7) T. Murakami and K. Ohnishi: "An Advanced Approach to Servo Control in Industrial Robot", IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems p. 379 (1988)
- (8) K. Ohnishi: "Advanced Motion Control in Robotics", IEEE Industrial Electronics Soc. Conf. Proc., SP4.2 (1989)
- (9) S. Takakura, T. Murakami and K. Ohnishi: "An Approach to Collision Detection and Recovery Motion in Industrial Robot", IEEE Industrial Electronics Soc. Conf. Proc., SP7.3 (1989)
- (10) S. Komada and K. Ohnishi: "Control of Robotic Manipulators by Joint Acceleration Controller", IEEE Industrial Electronics Soc. Conf. Proc., FA7.3 (1989)