傾斜角が未知な支持面上に設置されたリンク系の運動制御

大須賀 公 一*

Control of Link System on Unknown Sloped Foundation

Koichi Osuka*

In this research, we discuss motion control of link system which is mounted on a foundation with an inclination of unknown angle. Here, the most interesting point is that the link system is assumed to have only internal sensors instead of external sensors. That is, the system can not measure the absolute posture (the direction of the vertical direction). In this situation, we try to control the absolute posture of the link system.

In this paper, constructing a nonlinear observer for estimating the absolute posture of the link system, we design an exponential stabilizing control law. The notable point of this paper is the simplicity of the result. This simplicity is due to the special features of the system.

Key Words: Link System, Nonlinear Observer, Posture Control

1. はじめに

本報告では、必ずしも水平とは限らない支持面を想定し、その上に設置されたリンク系の運動制御について考察する。ただし、リンク系には内界センサ（リンク間の相対角度や角速度情報が検出される）のみが内蔵されておりリンクの絶対角度（鉛直上向きとの角度）は直接検出できないものとする。このとき、支持面の傾きが未知であるにもかかわらず、リンク系の絶対姿勢（リンクの絶対角度）を指定する問題を考えるのである。

このような問題に含まれる例を二つ Fig. 1 に示しておく。同図 (a) では斜面上で人間が直立する様子を表しており、明らかにリンク系の絶対的な姿勢が問題となる。また、同図 (b) は同様に斜面上に設置されたマニピュレータで液体の入ったコップを把持している様子を示している。この場合は、手先を水平に保つ必要がある。本問題において問題となる点は、(A) 支持面が傾斜している、(B) その傾斜角度が未知なので内界センサでは直接リンク系の絶対姿勢を測定することができない、(C) 多リンク系なので非線形システムとなる、である。これら (A) (B) (C) の課題に関連が深い研究に、梶原ら [1]、松本ら [2]、平林ら [3]、川谷ら [4]、田島ら [5] の結果がある。しかしながらこれらは何らかのタイプの 1 リンク倒立振り子であることに加えて、以下の点で本論文で考察する問題とは異なっている。梶原ら [1] の研究では、傾斜されたレール上の倒立振り子の倒立制御が行われており、(A) について取り組んだ先導的な研究である。しか

し、(B) (C) については考慮されていない。松本ら [2] は、斜面上を走行する一輪車ロボットの倒立制御について考察しており、(A) (B) については考慮されている。特にオブザーバを用いて内界センサから支持面の傾斜角度を推定している点が興味深い。しかしながら、基本的には 1 リンク系になっていることと線形近似を行って議論を行っている点が、(C) の観点からみて不十分である。平林ら [3] は未知曲面上を移動するアーム付一輪車倒立振り子を取り扱っている。その意味からは (A) (B) を考慮し (C) にも関連深い。非線形系としての扱いはなされていない点が不十分である。川谷ら [4] は倒立振り子系に非線形オブザーバを適用した点で興味深い。しかしながら、リンクの絶対角度は測定できるとし、オブザーバで推定するのは振子の角速度である点で (A) (B) についての考察にはなっていない

Fig. 1 Examples

原稿受付 1999 年 7 月 9 日

*京都大学

*Kyoto University

い。また、倒立振子を非線形システムとして取り扱っているがそのモデルに近似が含まれていることと制御則を含めた制御系全体の安定性に関しては議論されていない点が (C) の観点からみた不十分な点である。田島ら [5] の結果は内界センサのみで一輪車ロボットを倒立させようとするものである。直接議論はされていないが、(A) (B) を考慮しうる方法である。ただし、これも線形近似モデルで議論されているので (C) に関しては考察されていない。これら以外にも本研究と関連深い研究として Takemori ら [6] の結果があるが、これは外界センサを用いることにより振子の絶対姿勢を検出しており、本論文のテーマとは異なっている。

以上から、従来の研究はそのまま本研究には適用できないことが分かる。

そこで本論文では、先にあげた問題点 (A) (B) (C) に対処するために、(a) 指数減衰形非線形オブザーバを構成することでリンク系の絶対姿勢を推定し、(b) 推定された情報を用いた制御則を設計し、(c) 全系の安定性を非線形系として証明する、という手順を考える。本論文において最も重要な点は制御系を非線形システムとして取り扱っている点である。構成は以下のとおりである。まず、第2章で、具体的な問題設定を行い、第3章で制御則の設計から制御系の安定性の考察までを行う。そして、第4章で提案手法の有効性を確認するためにシミュレーションを行う。最後に第5章でまとめる。

以下では、 $\lambda_i(A)$ を行列 A の第 i 番目の固有値、 $\|\cdot\|$ をベクトルのユークリッドノルムあるいは行列の誘導ノルムとする。

2. 問題の設定

Fig. 2 のような、未知な角度 α で傾斜している支持面上に設置された棒の n リンク系を考える。ここで、リンク数は任意である。リンク番号は、支持面（リンク 0 とする）に近いほうからリンク 1, 2, ... とし、関節番号は支持面に近いほうから第 1, 2, ... とする。

また、 l_i をリンク i の長さ、 r_i を関節 i からリンク i の重心までの長さ、 m_i をリンク i の質量、 I_i をリンク i の重心回りの慣性モーメント、 q_i を鉛直軸からリンク i までの回転角度（時計まわりを正、 $q_0 = \alpha$ とする）、 τ_i をリンク i とリンク $i-1$ との間の相対トルクとする。

このとき本リンク系の運動方程式は次のように書ける [7] [8]（摩擦項はすべて省略、あるいはあらかじめ補償しているとする）。

$$J(q_\Delta)\ddot{q} + C(q_\Delta)\dot{q}^2 + G\sin q = D\tau \quad (1)$$

ただし、 $q = [q_1, \dots, q_n]^T$, $\dot{q}^2 = [\dot{q}_1^2, \dots, \dot{q}_n^2]^T$, $q_\Delta = [\theta_{12}, \dots, \theta_{1n}, \theta_{23}, \dots, \theta_{2n}, \theta_{n-1n}]^T$, $\theta_{ij} = q_i - q_j$, $\sin q = [\sin q_1, \dots, \sin q_n]^T$, $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_n]^T$ であり、 $J(q_\Delta)$, $C(q_\Delta)$, G は $i \leq j$ において

$$J(q_\Delta) = [J_{ij}] = [k_{ij} \cos \theta_{ij}] \quad (2)$$

$$C(q_\Delta) = [C_{ij}] = [k_{ij} \sin \theta_{ij}] \quad (3)$$

$$G = [G_{ij}] = \left[-\delta_{ij}g \left(m_i r_i + l_i \sum_{k=i+1}^n m_k \right) \right] \quad (4)$$

Fig. 2 Link system

$$k_{ij} = \delta_{ij}(I_i + m_i r_i^2) + (1 - \delta_{ij})m_j r_j l_i + l_i l_j \sum_{k=j+1}^n m_k \quad (5)$$

である。ここに δ_{ij} はクロネッカーデルタであり、 D はリンクへ加えられる絶対トルクと相対トルクの変換行列である。

ここで次のような仮定を設ける。

[A1] リンク系の物理パラメータはすべて既知とする。

[A2] リンクの絶対姿勢 (q) は測定できないが、隣どうしのリンク間の相対角度 $\theta = [\theta_{01}, \theta_{12}, \dots, \theta_{n-1n}]^T$ 、相対角速度 $\dot{\theta}$ は測定できる。

[A3] 隣り合ったリンク間には相対トルク τ が加えられる。

[A4] 支持面の傾斜角度 α は未知である。

この仮定と式 (1)~(5) より次の性質が得られる。

[Pro1] 任意の q_Δ に対して $J(q_\Delta) > 0$ である。

[Pro2] q_Δ は測定できる (q_Δ の定義と [A2] より)。

[Pro3] $\dot{q}$ は次式より入手できる。

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & \cdots & 1 \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (6)$$

[Pro4] $J(q_\Delta)$, $C(q_\Delta)$, G , D はすべて既知である。

このとき、次の問題を考えよう。

[問題] 仮定 [A1]~[A4] を満たすリンク系 (1)~(5) が与えられたとする。このとき、入手できる情報のみで制御則

$$\tau = h(\theta, \dot{\theta}, \tau) \quad (7)$$

を構成し $\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0$ を達成せよ。

Remark 1 ここでは分岐のないリンク系を取り扱い目標値を 0 としたが、これらは記述の簡略化のためで、本質的ではない。本問題が解けると Fig. 1 で示した例に対する制御問題が解ける。その他にも、マスタースレーブマニピュレータシステムでマスターアームとスレーブアームが設置されている土台に傾斜角の差があっても両者の絶対的な姿勢を一致させることができる、などの応用が考えられる。

この問題の解は自明ではないが、それは「絶対姿勢を制御するためには絶対角度 q とその角速度 $\dot{q}$ の情報が必要になる」という状況において、 $\dot{q}$ は入手可能な相対角速度情報から得られるが q が入手できないからである。したがって本論文ではオブザーバを構成し q を推定するのである。ただし、上の性質から絶対姿勢 q が未知でも $J(q_\Delta), C(q_\Delta)\dot{q}^2$ は既知となり、絶対姿勢が関係するのは重力項のみになる点に注目する。この点が後の議論で重要な役割を果たす。

3. 制御系の設計

ここでは次のような手順で与えられた問題を解く。

Step1) まず、 $\theta, \dot{\theta}, \tau$ から q の推定値 $\hat{q}$ を推定するオブザーバを構成する。

Step2) q の代わりに $\hat{q}$ を用いた制御則を設計し、オブザーバ併合系の安定性を示す。

3.1 指数減衰型オブザーバ

支持面の傾斜角が未知であることから未知になっている q の推定値 $\hat{q}$ を推定する。ここでは指数減衰型非線形オブザーバによってその機能を実現する ($\dot{q}$ (測定可能) の積分では求められない。後述の Remark2 参照.)。

まず、性質 [Por2]~[Pro4] より、新しい入力 u を含んだ入力

$$\tau = D^{-1} [C(q_\Delta)\dot{q}^2 + u] \quad (8)$$

を発生できるのでシステム (1) に加えると

$$J(q_\Delta)\ddot{q} + G\sin q = u \quad (9)$$

を得る。そこで、 $x_1 = q, x_2 = \dot{q}, x^T = [x_1^T, x_2^T]^T$ とおくと次式を得る。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(q_\Delta)u + \varphi(q_\Delta, x_1) \\ y = Hx \end{cases} \quad (10)$$

ただし、

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix}, \quad B(q_\Delta) = \begin{bmatrix} 0 \\ J(q_\Delta)^{-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\varphi(q_\Delta, x_1) = \begin{bmatrix} 0 \\ -x_1 - J(q_\Delta)^{-1}G\sin x_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \quad (13)$$

とおいた (I は n 次元単位行列, 0 は n 次元 0 行列とする)。

そこで、システム (10)~(13) に対して次のようなオブザーバを構成する。

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + B(q_\Delta)u + \varphi(q_\Delta, z_1) + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = Hz \\ \hat{q} = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 $z^T = [z_1^T, z_2^T]^T$ であり、 K はオブザーバゲインである。このとき次の補題が得られる。

補題 1 システム (9) (あるいは式 (10)) とシステム (14) を考える。そして、行列 $A_K := A - KH$ が安定になり、かつ

$$1 + \frac{\max_{q_\Delta} \|J(q_\Delta)^{-1}\| \|G\|}{\sqrt{n}} < \min_{1 \leq i \leq n} |\Re \lambda_i(A_K)| \quad (15)$$

となるように K を選ぶ。そうすると、システム (14) はシステム (9) に対する指数減衰型オブザーバになっている。すなわち、任意の時間 $t \geq 0$ で

$$\|e(t)\| < \kappa \|e(0)\| \exp(-\mu t) \quad (16)$$

となる定数 κ, μ が存在する。ただし、 $e(t) = q(t) - \hat{q}(t)$ とおいた。

証明 システム (10) とシステム (14) から誤差システムを求め、積分の定理 [9] を用いると次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_K e + [\varphi(q_\Delta, x_1) - \varphi(q_\Delta, z_1)] \\ &= A_K e + \int_0^1 \nabla \varphi(q_\Delta, w_s) ds e_1 \\ &= A_K + \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda(q_\Delta, x_1, z_1) \end{bmatrix} Re \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、 $e^T = [e_1^T, e_2^T]^T$ とおき、 $\nabla \varphi(q_\Delta, w_s)$ は $\varphi(q_\Delta, w_s)$ の w_s に関するグラジエントであり、 $w_s = sx_1 + (1-s)z_1 = [w_{s1}, \dots, w_{sn}]^T$ とおいた。また、

$$R = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\Lambda(q_\Delta, x_1, z_1) = I - J(q_\Delta)^{-1}G \int_0^1 C\bar{O}S w_s ds \quad (19)$$

$$C\bar{O}S w_s = \text{diag}[\cos w_{s1}, \dots, \cos w_{sn}] \quad (20)$$

である。ここで、 K を上のようを選んでおき (ペア (H, A) が可観測なので常に可能), 正定行列 P を

$$A_K^T P + P A_K = -I \quad (21)$$

満たすように選ぶ。そして次の関数を考える。

$$V = e^T P e \quad (22)$$

上式を式 (17) に沿って微分すると、

$$\dot{V} = -e^T e + 2e^T P \begin{bmatrix} 0 \\ \Lambda(q_\Delta, x_1, z_1) \end{bmatrix} Re \quad (23)$$

$$\leq -\|e\|^2 + 2\|P\| \|\Lambda(q_\Delta, x_1, z_1)\| \|e\|^2 \quad (24)$$

$$= -(1 - 2\|P\| \|\Lambda(q_\Delta, x_1, z_1)\|) \|e\|^2 \quad (25)$$

となる。したがって、

$$\|\Lambda(q_\Delta, x_1, z_1)\| < \frac{1}{2\|P\|} \quad (26)$$

となっていれば $\dot{V} < \epsilon V$ となる正定数 ϵ が存在する。したがって式 (16) を得る [10]。ところで、式 (19) より

$$\begin{aligned} \|\Lambda(q_\Delta, x_1, z_1)\| &< 1 + \|J(q_\Delta)^{-1}\| \|G\| \left\| \int_0^1 C \tilde{O} S w_s ds \right\| \\ &< 1 + \|J(q_\Delta)^{-1}\| \|G\| \sqrt{n} < \infty \end{aligned} \quad (27)$$

および

$$\min_{1 \leq i \leq n} |\Re \lambda_i(A_k)| < \frac{1}{2\|P\|} \quad (28)$$

なので [11]、式 (26) が成り立つ十分条件は、式 (15) である。以上より補題が成り立つ。 ■

Remark 2 オブザーバを用いることの必要性について考察する。例えば、 q から $\dot{q}$ を推定することを考える。この場合、もしも q が測定できれば、 $\dot{q}$ は理想的な微分器の存在性の仮定のもとで $\dot{q}$ は q から得られる。しかしながら、逆（本稿で考えている問題）は成り立たない。すなわち、たとえ理想的な積分器が存在しても $\dot{q}$ から q は求められない。積分定数が未知数として残るからである。したがってこのような場合にはオブザーバを用いることが必然となる。そして、オブザーバが有効になるのは重力項があるからである (3.3 参照)。

3.2 制御則の設計

前項より $\dot{q}$ が推定できたのでこれを用いて制御則を設計する。

まず、 $\dot{q} = q$ のとき式 (9) において $x = 0$ が漸近安定になるように次のような制御則を考える。

$$u = J(q_\Delta)(-k_v \dot{q} - k_p q) + G \tilde{s} \dot{q} \quad (29)$$

ここで次の定理が得られる。

定理 1 システム (9) とオブザーバ (14) および入力 (29) を考える。このとき、式 (15) が満たされ、スカラー k_v , k_p が共に正に選ばれておれば

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q}(t) = 0 \quad (30)$$

となる。

証明補題 1 より

$$\dot{q}(t) = q(t) + \eta(t) \quad (31)$$

となる。ただし、 $\eta(t) = [\eta_1(t), \dots, \eta_n(t)]^T$ で、ある定数 γ と μ に対して、任意の $t \leq 0$ において

$$\|\eta(t)\| < \gamma \exp(-\mu t) \quad (32)$$

となっている。そこで式 (31) を式 (29) に代入し、さらにそれを式 (9) に代入すると

$$\ddot{q} + k_v \dot{q} + k_p q \quad (33)$$

$$= J(q_\Delta)^{-1} G (\tilde{s} \dot{q} - \dot{s} q) - k_p \eta(t) \quad (34)$$

を得る。明らかに式 (34) の右辺は常に有界かつ時間とともに零に収束していく。したがって、式 (30) が得られる。 ■

以上まとめると、所望の制御則は次のようになる。

[制御則]

$$\tau = D^{-1} [C(q_\Delta) \dot{q}^2 + u] \quad (35)$$

$$u = J(q_\Delta)(-k_v \dot{q} - k_p q) + G \tilde{s} \dot{q} \quad (36)$$

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + B(q_\Delta)u + \varphi(q_\Delta, z_1) + K(y - \hat{y}) \\ \dot{\hat{y}} = Hz \\ \dot{\hat{q}} = Rz \end{cases} \quad (37)$$

3.3 考察

本問題において重力項が果たしている役割について考察する。**Fig. 3** のような 1 リンクアームを考える。このときの運動方程式は、 q をリンクの鉛直上向きに対する角度、 r を入力トルクとし、さらに物理パラメータを適切に定義することにより

$$\ddot{q} + M \sin q = r \quad (38)$$

と求められ、ブロック線図は **Fig. 4** (a) のようになる。

ここで「 $\dot{q}$ から q が推定できるか」という問題は、本論文で考察している問題の基本であるが、これは上で示したようにオブザーバを構成すれば解くことができる。その直感的理由は、次のようである。

すなわち本系では、**Fig. 4** (a) に示すように、 $\dot{q}$ の中には、重力項のパスを通った q の情報が含まれている。したがって、 $\dot{q}$

Fig. 3 One link arm

Fig. 4 When can we estimate q from $\dot{q}$?

から q が推定できることになる。一方、重力項がないと本アームのブロック線図は Fig. 4(b) のようになり、明らかに、 q の情報は $\dot{q}$ に含まれない。したがって $\dot{q}$ は q からは推定できないことになる。これは、線形システム理論における「可観測性」が崩れることに対応している。

以上から、本問題においては重力項の存在が重要な役割を果たすことが分かる。

4. シミュレーション

先の結果の有効性を検証するために、シミュレーションを行った。Fig. 5 のように未知な角度で傾斜している斜面上に設置された 2 リンクマニピュレータを想定する。本マニピュレータは均質なリンクからなっており、主要パラメータと変数を下に示す（支持面をリンク 0 とし、根元からリンク 1、リンク 2 と呼ぶ）。

$m_i = 2.0$ [kg]: リンク i の質量

$l_i = 0.5$ [m]: リンク i の長さ

$g = 9.8$ [m/s²]: 重力加速度

α [rad]: 傾斜面の傾斜角度

θ_i [rad]: リンク i とリンク $i-1$ の相対角度 ($= \theta_{i-1,i}$)

q_i [rad]: リンク i の鉛直上向きに対する絶対角度

τ_i [Nm]: 関節 i に加えられる相対トルク

また本マニピュレータの運動方程式は (1) のように求められ、仮定 [A1]~[A4] が満たされているものとする。ただし、この場合の式 (2)~(4)、および D は以下の通りである。

$$J(q_\Delta) = \begin{bmatrix} J_1 & R_r \cos \theta_2 \\ R_r \cos \theta_2 & J_2 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$C(q_\Delta) = \begin{bmatrix} 0 & R_r \sin \theta_2 \\ R_r \sin \theta_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$G = \begin{bmatrix} -(m_1 + 2m_2)l_1 g & 0 \\ 0 & -m_2 l_2 g \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Fig. 5 2-link manipulator

ただし、

$$\begin{aligned} I_1 &= m_1 l_1^2 / 3, & I_2 &= m_2 l_2^2 / 3 \\ J_1 &= I_1 + (m_1 + 4m_2) l_1^2, & J_2 &= I_2 + m_2 l_2^2 \\ R_r &= 2m_2 l_1 l_2 \end{aligned} \quad (43)$$

とおいた。

このとき、Fig. 5 に対して、第 2 章で提示した「問題」の解を「定理 1」「制御則」に従って求めると次のようになった。

まず、与えられたパラメータを用いて数値計算すると

$$1 + \frac{\max_{q_\Delta} \|J(q_\Delta)^{-1}\| \|G\|}{\sqrt{n}} < 84 \quad (44)$$

が得られた。ここで、オブザーバゲイン K を

$$K = [8099I \quad 180I] \quad (45)$$

と置くと

$$\min_{1 \leq i \leq 2} |\Re \lambda_i(A_K)| = 90 \quad (46)$$

となり、条件 (15) を満たすことが分かる。

そこで、式 (35)~(37) に従ってオブザーバと制御則を構成した。ただし、

$$k_v = 50, \quad k_p = 1000 \quad (47)$$

と置いた。

以上のような状況のもとで、

Fig. 6 Simulated result

[斜面の傾斜角度]

$$\alpha = \frac{2\pi}{360} 20 [\text{rad}] \quad (48)$$

[マニピュレータの初期状態]

$$q(0) = \left[\frac{2\pi}{360} 20 \quad \frac{2\pi}{360} 10 \right] [\text{rad}], \quad \dot{q}(0) = [0 \ 0] [\text{rad/sec}] \quad (49)$$

[オブザーバの初期状態]

$$\hat{q}(0) = [0 \ 0] [\text{rad}], \quad \dot{\hat{q}}(0) = [0 \ 0] [\text{rad/sec}] \quad (50)$$

[マニピュレータの目標状態]

$$q_r = [0 \ 0] [\text{rad}], \quad \dot{q}_r = [0 \ 0] [\text{rad/sec}] \quad (51)$$

としてシミュレーションを行った結果を Fig. 6 に示す。図中、上が q_1 (未知) の応答 (太線) とそのときの推定値 $\hat{q}_1$ の挙動 (細線)、下が q_2 (未知) の応答 (太線) とそのときの推定値 $\hat{q}_2$ の挙動 (細線) を表している。図より所望の結果が得られていることが分かる。

以上より、提案手法の有効性が示された。

5. おわりに

本論文では、内界センサしか持っていないリンク系 (ヒューマノイドなどを意識して、垂直平面内ではあるが、任意の木構造を有するリンク系を考えた) が傾斜角未知の斜面上に設置されている状況を考え、その絶対姿勢を制御する問題について考察した。ここで考えている内界センサとしては、関節角度センサと角速度センサやレイトジャイロなどである。

本問題を解くには内界センサの情報から何らかの方法によってリンク系の絶対姿勢を推定しなくてはならない。ここでは、リンク系の運動方程式において絶対姿勢が現れるのは重力項のみであることに注目し、指数減衰型非線形オブザーバを構成することによってその機能を実現した。その結果はシンプルであるにもかかわらず、制御系全体の大域的安定論を論じることができた。また、提案手法の有効性はシミュレーションによって確認した。

今後の課題は、モデル化誤差に対するロバスト性の考察、および、傾斜角が一定値ではなく時々刻々変化する場合を考えることである。

参考文献

- [1] 梶原, 小菅, 古田: “傾斜されたレール上の二重倒立振子の位置制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.15, no.12, pp.874-879, 1979.
- [2] 松本, 梶田, 谷: “移動ロボットの内外界センサのみによる姿勢検出とその制御”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.5, pp.541-550, 1990.
- [3] 平林, 山藤: “可変構造型移動ロボットの制御に関する研究 (第6報), 制御アーム-車輪型モデルの形状が未知の曲面上の走行”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.59, no.563, pp.2185-2190, 1992.
- [4] 川谷, 土井, 外川: “倒立振子系に対する非線形オブザーバの一構成法”, 計測自動制御学会論文集, vol.30, no.11, pp.1408-1410, 1994.
- [5] 田島, 鈴木, 荒井, 劉, 美多: “一輪車ロボットの姿勢安定化制御”, 第17回 DST シンポジウム資料, pp.249-252, 1994.
- [6] F. Takemori and Y. Okuyama: “Stabilizing Control of a Monocycle based on H^∞ Control Theory—Detection of the Attitude by Using a Visual Sensor,” Proc. of the ASCC, vol.I, pp.591-594, 1994.
- [7] 大須賀, 沖原, 小野: “マスタースレーブ型二足歩行ロボット—分岐のある n 自由度リンク機構の運動方程式について”, SICE '94 資料, pp.361-362, 1994.
- [8] K. Osuka, Y. Okihara and T. Ono: “On Dynamical Equation of Tree Structured Link Systems,” Proc. of ISMCR '95, pp.307-311, 1995.
- [9] J.M. Ortega and W.C. Rheinboldt: Iterative Solution of Nonlinear Equations in Several Variables. Academic Press, 1970.
- [10] S.R. Tuo, D.L. Elliott and T.J. Tarn: “Exponential Observer for Nonlinear Dynamic Systems,” Information and Control, 29, pp.204-216, 1975.
- [11] 森, 福岡, 桑原: “リヤプノフ行列方程式と実行列の固有値の存在範囲”, 計測自動制御学会論文集, vol.18, no.5, pp.537-539, 1982.

大須賀公一 (Koichi Osuka)

1959年11月16日生。1984年大阪大学大学院基礎工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社。総合研究所勤務。1986年大阪府立大学工学部機械工学科助手。同講師。同助教授を経て、1998年京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻助教授となり、現在に至る。1988年計測自動制御学会論文賞受賞など。ロボティクス、制御工学の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)