Journal of National Fisheries University 58 (3) 199－205 (2010)

時変フィードバックゲインを用いた水中ロボットマニピュレータのロバスト制御

平　雄一郎

Robust Control for Underwater Robot Manipulators with a Time-Varying Feedback Gain

Yuichiro Taira

Abstract : In this report, a robust controller for underwater robots equipped with a manipulator (underwater robot manipulators) is developed to overcome uncertainties in robot dynamics and hydrodynamic forces. The proposed controller has the following features : (1) the structure of the controller is very simple in comparison with that of an adaptive controller using a regressor of a robot dynamic equation ; (2) the controller is developed without using a function specific to sliding mode type robust control, such as a signum function and a saturation function, which often leads to oscillations in control inputs; and (3) the maximum value of a tracking error norm can be arbitrarily reduced by setting controller design parameters. Furthermore, numerical simulations whose model is a 2 link planar underwater robot manipulator are performed. The simulation results demonstrate the validity of the theoretical results (the controller features).

Key words : Fishery engineering, Underwater robot, Manipulator, Robust control, Time-varying feedback gain

はじめに

近年，安全かつ効率的な海洋調査を実現するため，自律型海中ロボット（Autonomous Underwater Vehicle）の研究・開発が行われている[1, 2]。将来，このロボットは海底通信ケーブルの設置・保守などの海中工事，漁場における海底障害物・汚染源の除去作業などの海洋開発・保全のために用いられることが予想される。そのため，このロボットには，有索無人潜水機（Remotely Operated Vehicle）と同様に，人間の腕・手に相当する作業用マニピュレータが搭載されている必要がある。本報告では，作業用マニピュレータを搭載した自律型海中ロボット（以下では，海中を含めて水中ロボットマニピュレータと呼ぶ）を対象とする。

この水中ロボットマニピュレータに対し，ロボット本体およびマニピュレータ手先両方の位置を理想軌道に追従させる制御法が種々提案されている[3-8]。これらのコントローラでは，ロボットならびに流体力に関するパラメータ（質量，抗力係数など）が既知であるという条件で，位置誤差の漸近安定性[9]（誤差が０に収束すること）が保証されている。しかしながら，水中ロボットの実機のパラメータには一般に不確かさが存在する。さらに，マニピュレータが把持する物体のパラメータは未知である場合が多い。

これに対し，未知パラメータを前提とした適応制御法が提案されている[10-12]。これらの適応コントローラでは，既知パラメータに対する制御法[3-8]と同様に，位置誤差の漸近安定性が達成されている。しかしながら，流体力項のある運動方程式から得られるregressor（パラメータを含

2009年９月11日受付．Received September 11, 2009.
水産大学校海洋機械工学科（Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University）
別刷り請求先（corresponding author）：taira@fish-u.ac.jp

まない信号）がコントローラに含まれていることから，コントローラの構造が非常に複雑であるという課題がある。また，未知パラメータを前提とした制御法として，スライディングモード制御に基づくロバスト制御法も提案されている[13-15]。これらのコントローラでは，符号関数を用いることにより，位置誤差の漸近安定性が得られている。しかしながら，この符号関数は不連続関数であるため，コントローラを実装した場合，制御入力にチャタリング（高周波振動）が発生する可能性が高い[16,17]。チャタリングが発生すれば，アクチュエータに多大な負担がかかるし，制御性能が一般に劣化する。そこで，このチャタリングを防止するため，符号関数を連続関数である飽和関数に置換した連続スライディングモード制御法が提案されている[18-21]。これらのコントローラでは，漸近安定性よりも安定度が弱い位置誤差の終局的有界性[9]（最終的に誤差がある値以下になること）が達成される。しかしながら，コントローラを実装した場合，システムのサンプリング周期が十分短くなければ，チャタリング回避のために設計パラメータを保守的に決定しなければならず，良好な制御性能が得られない。さらに，この場合，制御入力に大きな振幅の低周波振動が発生することがある[17]。なお，マニピュレータ手先ならびに対象物の位置の計測には，CCDカメラなどの視覚センサが用いられることが考えられるが，サーボコントローラ（モータの駆動部分）のサンプリング周期は一般に１[ms]程度であるのに対し，一般的なCCDカメラのサンプリング周期は33[ms]であり[22]，一般的な視覚センサを用いたとき，システムのサンプリング周期を短くできない。一方，短いサンプリング周期の特殊な視覚センサを用いた場合，ロボット製作にかかるコストが増大することが予想される。

本報告では，スライディングモード制御に基づかない，時変フィードバックゲインを用いたロバスト制御法を提案する。本手法の特徴は，１）運動方程式のregressorを用いていないため，従来の適応コントローラ[10-12]と比較して，コントローラ構造が非常に簡単であること，２）制御入力が振動的になりやすい，従来のロバストコントローラ[13-15,18-21]における符号関数あるいは飽和関数を用いていないこと，３）位置誤差の終局的有界性が保証され，さらに設計パラメータを大きく設定することにより，位置誤差のノルムの最大値を任意に小さくできることである。

なお，本報告で用いるノルムとしては，ベクトルの場合にはユークリッドノルム（$\|\bar{x}\|=\sqrt{\bar{x}^T\bar{x}}$），また行列の場合にはその誘導ノルム（$\|\bar{A}\|=\sqrt{\lambda_{\max}\{\bar{A}^T\bar{A}\}}$）とする（$\lambda_{\max}\{\cdot\}$は最大固有値）。

モデルの記述

本報告では，１本のm_nリンク回転関節マニピュレータを搭載した水中ロボット（Fig. 1 参照）を対象とする（$m_n \geq m_p$）。なお，m_pは並進運動の次元である。すなわち，空間内を動ける場合は$m_p=3$であり，平面上の動きに拘束される場合は$m_p=2$である。一方，回転運動の次元をm_oとし，$m_p=3$の場合は$m_o=3$，$m_p=2$の場合は$m_o=1$となる。これに関連する次元として，$m=m_o+m_n$ならびに$n=m_p+m_o+m_n$を定義しておく。

水中ロボットマニピュレータの挙動を記述する数学モデルは次式で与えられる[23]。

$$M(q)\ddot{\phi}+C(q,\dot{\phi})\dot{\phi}+d(q,\dot{\phi})+g(q)=\tau \tag{1}$$

ただし，$q\in R^m$は本体姿勢角度・マニピュレータ関節角度から構成される変数，$\phi\in R^n$は本体位置とqから構成される変数，$\tau\in R^n$は本体推進力・本体推進トルク・マニピュレータ関節トルクから構成される変数，$M(\cdot)\in R^{n\times n}$は慣性行列，$C(\cdot)\in R^{n\times n}$は遠心力・コリオリ力の係数行列，$d(\cdot)\in R^n$は流体抗力，$g(\cdot)\in R^n$は重力・浮力である。

数学モデル(1)において，制御系設計で役立つ以下の性質が成立する。

［性質１］　$M(\cdot)$は正定対称行列である。

［性質２］　回転関節マニピュレータの場合，$M(\cdot)$，$C(\cdot)$，$d(\cdot)$，$g(\cdot)$に対して

$$\|M(q)\|\leq c_{M1},\ \|M(q)^{-1}\|\leq c_{M2},\ \|\dot{M}(q,\dot{q})\|\leq c_{M3}\|\dot{\phi}\|,$$
$$\|C(q,\dot{\phi})\|\leq c_C\|\dot{\phi}\|,\ \|d(q,\dot{\phi})\|\leq c_d\|\dot{\phi}\|^2,\ \|g(q)\|\leq c_g \tag{2}$$

を満足する正定数$c_{M1}, c_{M2}, c_{M3}, c_C, c_d, c_g\in R$が存在する。

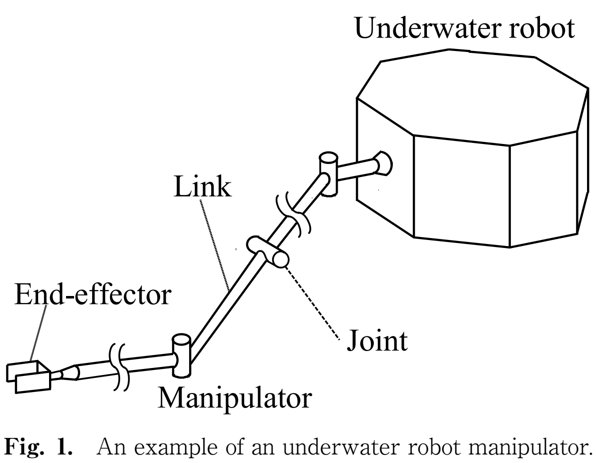


Fig. 1.　An example of an underwater robot manipulator.

制御系設計

本報告の制御系設計目的は，(1)におけるパラメータ（質量など）および(2)の正定数c_*が未知定数である場合に，制御系信号の有界性[9]（常に有限な値になること）を確保し，かつϕを時変の理想軌道ϕ_rに追従させることである。さらに，その追従性能は$\|\tilde{\phi}\|$の最大値を任意に小さくできる形式の終局的有界性とする。ただし，$\tilde{\phi}=\phi-\phi_r$である。この目的を達成するコントローラを開発するため，以下の仮定を設ける。

【仮定１】利用可能な信号はϕ，$\dot{\phi}$である。

【仮定２】制御入力はτである。

【仮定３】パラメータがその公称値で与えられる$\hat{g}(q)$は既知関数である。

【仮定４】理想軌道に関し，つぎの不等式が成立する。

$$\|\phi_r\|\leq c_{r1},\ \|\dot{\phi}_r\|\leq c_{r2},\ \|\ddot{\phi}_r\|\leq c_{r3}, \tag{3}$$

ただし，$c_{r1}, c_{r2}, c_{r3}\in R$は正定数である。

【仮定５】理想軌道ϕ_rとその時間微分$\dot{\phi}_r$は利用可能である。

仮定１～４は水中ロボットマニピュレータ制御法開発の際に設定される標準的な仮定である。また，一般の陸上マニピュレータと同様に，逆運動学ならびに微分逆運動学アルゴリズムを用いれば，仮定５は実現される。ここで，仮定３ならびに(2)第６式を考慮すれば，次式を満足する正定数c_Nが存在することがわかる。

$$\|g(q)-\hat{g}(q)\|\leq c_N \tag{4}$$

制御則

ここで提案する制御入力は次式で構成される。この入力はLyapunov安定論[9]に基づいて導出されている。

$$\tau=-[A_2+\beta(\phi,\dot{\phi})I_n]\mu-\tilde{\phi}+\hat{g}(q) \tag{5}$$

$$\mu=\dot{\tilde{\phi}}+A_1\tilde{\phi},\ \tilde{\phi}=\phi-\phi_r$$

$$\beta(\phi,\dot{\phi})=1+\alpha_1^2+\|\dot{\phi}\|^2+\alpha_1^2\|\dot{\phi}\|^2+\|\dot{\phi}\|^4+\alpha_1^2\|\phi\|^2\|\dot{\phi}\|^2 \tag{6}$$

ただし，A_1，$A_2\in R^{n\times n}$は設計パラメータ（定数），$I_n\in R^{n\times n}$は単位行列，$\alpha_1\in R$はA_1に依存して決まる正定数である。また，この制御入力を用いた閉ループ系の構成をFig. ２に示す。なお，この制御入力の特徴は，１)時変フィードバックゲイン$\beta(\cdot)$の項により，制御系の安定化に貢献しない流体力などの非線形項の信号部分を消去していることから，重力項を除いて，運動方程式(1)の信号部分（regressor）を用いる必要がなく，コントローラ構造が非常に簡単であること，２)$\beta(\cdot)$の項があるため，符号関数または飽和関数を用いる必要がないこと，３)定数フィードバックゲインA_1，A_2の項により，制御性能の改善が達成されることである。これらの特徴１）～３）は，「はじめに」において記述した特徴１）～３）にそれぞれ対応している。

上記設計目的を達成するため，設計パラメータを以下の条件を満足するよう設定する。

[条件１]A_1，A_2はその対角要素がすべて正定数である対角行列

$$A_1=\mathrm{diag}[a_{11}, a_{12},\cdots, a_{1n}]\in R^{n\times n}$$

$$A_2=\mathrm{diag}[a_{21}, a_{22},\cdots, a_{2n}]\in R^{n\times n} \tag{7}$$

に設定する（$a_{ij}\in R$は正定数）。さらに，これに関連したα_1を

$$\alpha_1=\|A_1\|=\max\{a_{11}, a_{12},\cdots, a_{1n}\} \tag{8}$$

に設定する。

[条件２]初期条件として，$\phi_r(0)=\phi(0)$，$\dot{\phi}_r(0)=\dot{\phi}(0)=0$に設定する。

誤差モデル

一般に，Lyapunov安定論を用いた制御系設計では，状態変数に関する数学モデルを誤差変数に関するもの（誤差モデル）に変換する必要がある。ここでは，数学モデル(1)が２階の非線形微分方程式であることから，$\tilde{\phi}$の誤差モデルに加えて(6)第１式で定義される新たな誤差μの誤差モデルも用いる。変換された誤差モデルは次式で与えられる。

$$\dot{\tilde{\phi}}=-A_1\tilde{\phi}+\mu$$

$$M(q)\dot{\mu}=-A_2\mu-\beta(\phi,\dot{\phi})\mu+w-\tilde{\phi}-\frac{1}{2}\dot{M}(q,\dot{q})\mu \tag{9}$$

ただし，

$$w=-[g(q)-\hat{g}(q)]-C(q,\dot{\phi})\dot{\phi}-d(q,\dot{\phi})-M(q)\ddot{\phi}_r$$

$$+M(q)A_1\dot{\phi}-M(q)A_1\dot{\phi}_r+\frac{1}{2}\dot{M}(q,\dot{q})\mu \tag{10}$$

である。以下に，誤差モデル(9)の導出を簡単に示す。ま

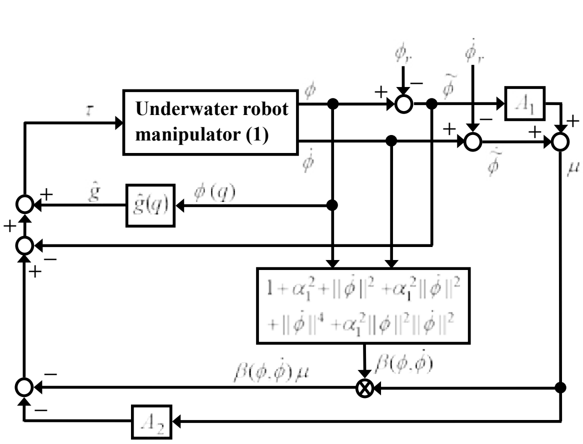


Fig. 2.　Configuration of control system.

ず，(6)第１式より，(9)第１式の$\tilde{\phi}$に関する誤差モデルは容易に求められる。つぎに，(6)第１式のμを時間微分したものに$M(\cdot)$を乗算すれば次式第１行となる。次式第１行の右辺第１項に(1)を代入すれば第２行となる。次式第２行の右辺第１項に(5)を代入して整理すれば第３行となる。次式３行右辺の括弧{ }に(10)を適用すれば，(9)第２式のμに関する誤差モデルが求められる。

$$\begin{aligned}M(\cdot)\dot{\mu} &= M(\cdot)\ddot{\phi}-M(\cdot)\ddot{\phi}_r+M(\cdot)A_1\dot{\phi}-M(\cdot)A_1\dot{\phi}_r\\ &=\tau-C(\cdot)\dot{\phi}-d(\cdot)-g(\cdot)-M(\cdot)\ddot{\phi}_r\\ &\quad +M(\cdot)A_1\dot{\phi}-M(\cdot)A_1\dot{\phi}_r\\ &=-A_2\mu-\beta(\cdot)\mu+\{-[g(\cdot)-\hat{g}(\cdot)]-C(\cdot)\dot{\phi}\\ &\quad -d(\cdot)-M(\cdot)\ddot{\phi}_r+M(\cdot)A_1\dot{\phi}-M(\cdot)A_1\dot{\phi}_r\\ &\quad +\frac{1}{2}\dot{M}(\cdot)\mu\}-\tilde{\phi}-\frac{1}{2}\dot{M}(\cdot)\mu \end{aligned} \tag{11}$$

安定性解析

まず，本題の安定性に関する定理の証明に必要となる$\mu^T w$の不等式を示しておく。

$$\mu^T w\le[\theta^T\xi(\phi,\dot{\phi})]\|\mu\| \tag{12}$$

ただし，$\theta\in R^6$は(2)～(4)の正定数c_*のみから構成される定数ベクトルであり，また

$$\xi(\phi,\dot{\phi})=[1,\alpha_1,\|\dot{\phi}\|,\alpha_1\|\dot{\phi}\|,\|\dot{\phi}\|^2,\alpha_1\|\phi\|\|\dot{\phi}\|]^T\in R^6 \tag{13}$$

である．この不等式の導出を簡単に示す。まず，$\mu^T w$に(10)を代入したものにSchwartz不等式ならびに誘導ノルムの性質を適用すれば次式第１行となる。次式第１行に(2)～(4)を適用し，$\|A_1\|=\alpha_1$を用いれば第２行となる。

$$\begin{aligned}\mu^T w &\le\|\mu\|[\|g(\cdot)-\hat{g}(\cdot)\|+\|C(\cdot)\|\|\dot{\phi}\|+\|d(\cdot)\|+\|M(\cdot)\|\|\ddot{\phi}_r\|\\ &\quad+\|M(\cdot)\|\|A_1\|\|\dot{\phi}\|+\|M(\cdot)\|\|A_1\|\|\dot{\phi}_r\|+\frac{1}{2}\|\dot{M}(\cdot)\|\|\dot{\phi}\|\\ &\quad+\frac{1}{2}\|\dot{M}(\cdot)\|\|\dot{\phi}_r\|+\frac{1}{2}\|\dot{M}(\cdot)\|\|A_1\|\|\phi\|\\ &\quad+\frac{1}{2}\|\dot{M}(\cdot)\|\|A_1\|\|\phi_r\|]\\ &\le\|\mu\|[(c_N+c_{M1}c_{r3})+c_{M1}c_{r2}\alpha_1+\frac{1}{2}c_{M3}c_{r2}\|\dot{\phi}\|\\ &\quad+(c_{M1}+\frac{1}{2}c_{M3}c_{r1})\alpha_1\|\dot{\phi}\|+(c_C+c_d+\frac{1}{2}c_{M3})\|\dot{\phi}\|^2\\ &\quad+\frac{1}{2}c_{M3}\alpha_1\|\phi\|\|\dot{\phi}\|]\end{aligned} \tag{14}$$

この式を整理すれば$\mu^T w$の不等式(12)が得られる。

提案法では，「はじめに」において記述した特徴３）のように，つぎの安定性に関する定理が成立する。

【定理】　ロバスト制御則(5)を用いれば，制御系信号ϕ，$\dot{\phi}$，τは有界となり，かつ追従誤差$\tilde{\phi}$の制御性能は次式で評価できる。

$$\|\tilde{\phi}\|^2\le\frac{2c_{V2}}{c_{V1}\alpha} \tag{15}$$

ただし，$\alpha=\min\{\alpha_{11},\alpha_{12},\cdots,\alpha_{1n},\alpha_{21},\alpha_{22},\cdots,\alpha_{2n}\}$，$c_{V1}=\min\{2/c_{M1},2\}$，$c_{V2}=\|\theta\|^2/4$である。

なお，正定数c_{V1}，c_{V2}が設計パラメータαと独立に決まるものであることに注意すれば，αを大きくすることにより$\|\tilde{\phi}\|^2$の最大値が小さくなることを，この定理の評価式(15)は表している。これにより，設計パラメータA_1，A_2の対角要素を大きくすることにより，制御性能が改善されることがわかる。

（証明）誤差に関する正定値関数Ｖを

$$V=\frac{1}{2}\mu^T M(\cdot)\mu+\frac{1}{2}\tilde{\phi}^T\tilde{\phi} \tag{16}$$

で定義する。そこで，性質１に注意してVを時間微分すれば次式第１行となり，さらに第１行第１項に(9)第２式の誤差モデルを，第３項に(9)第１式の誤差モデルを代入して整理すれば第２行となる。次式第２行の対角行列A_1，A_2の対角要素が正定数であることから第３行に変形される。次式第３行第３項に$\beta(\cdot)=\|\xi(\cdot)\|^2$を代入し，また第４項に(12)を適用すれば第４行となる。次式第４行第４項にSchwartz不等式$\bar{x}^T\bar{y}\le\|\bar{x}\|\|\bar{y}\|$（$\bar{x}$, $\bar{y}$はベクトル）を適用した後，不等式$\bar{a}\bar{b}\le\bar{a}^2+\bar{b}^2/4$（$\bar{a}$，$\bar{b}$はスカラー）を適用すれば第５行となる。次式第５行に関係式$\mu^T\mu\ge(\mu^T M(\cdot)\cdot\mu)/c_{M1}$を適用すれば第６行を得る。

$$\begin{aligned}\dot{V}&=\mu^T M(\cdot)\dot{\mu}+\frac{1}{2}\mu^T\dot{M}(\cdot)\mu+\tilde{\phi}^T\dot{\tilde{\phi}}\\ &=-\mu^T A_2\mu-\tilde{\phi}^T A_1\tilde{\phi}-\beta(\cdot)\|\mu\|^2+\mu^T w\\ &\le-\alpha\mu^T\mu-\alpha\tilde{\phi}^T\tilde{\phi}-\beta(\cdot)\|\mu\|^2+\mu^T w\\ &\le-\alpha\mu^T\mu-\alpha\tilde{\phi}^T\tilde{\phi}-\|\xi(\cdot)\|^2\|\mu\|^2+[\theta^T\xi(\cdot)]\|\mu\|\\ &\le-\alpha\mu^T\mu-\alpha\tilde{\phi}^T\tilde{\phi}+c_{V2}\\ &\le-c_{V1}\alpha V+c_{V2}\end{aligned} \tag{17}$$

さらに，この式の最終行はＶに関する不等式

$$V\le\exp\{-c_{V1}\alpha t\}V(0)+\frac{c_{V2}}{c_{V1}\alpha} \tag{18}$$

に変形される[24]。ただし，$\exp\{\cdot\}$は指数関数を表す。ここで，条件２の$\phi_r(0)=\phi(0)$，$\dot{\phi}_r(0)=\dot{\phi}(0)=0$より，$\tilde{\phi}(0)=0$かつ$\mu(0)=0$であり，$V(0)=0$となることから，最終的に次式が得られる。

$$V\le\frac{c_{V2}}{c_{V1}\alpha} \tag{19}$$

この不等式より，$\tilde{\phi}$とμが有界であることがわかる。さらに，(2)～(6)を用いれば，ϕ，$\dot{\tilde{\phi}}$，$\dot{\phi}$，$\beta(\cdot)$，τの有界性をこの順に保証していくことができる。また，この不等式ならびに不等式$(\tilde{\phi}^T\tilde{\phi})/2\le V$より，(15)が導出される。

数値シミュレーション

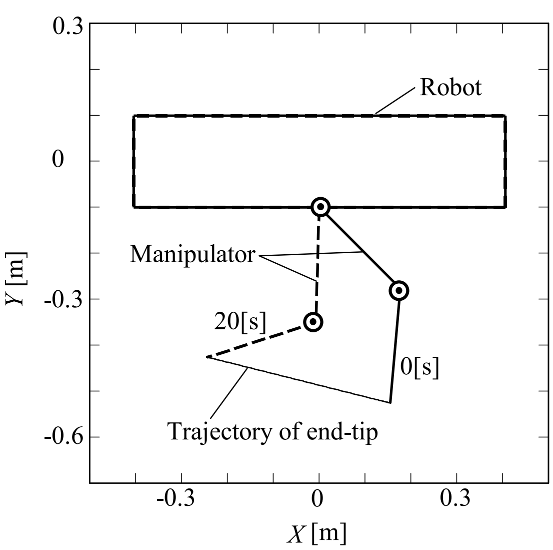
前節の理論解析をわかりやすくするために行った数値シミュレーション例を示す。シミュレーションで対象とした２次元２リンクマニピュレータを搭載した水中ロボットのパラメータをTable 1 に示す。なお，水中ロボットマニピュレータの実機のパラメータ[8]を参考にしてこれらのパラメータを決定した。シミュレーションの意図は，制御性能の評価式(15)のように，設計パラメータ α を大きくすることにより $\|\tilde{\phi}\|$ の最大値が小さくなることを確認することである。そのため，以下のすべてのシミュレーションにおいて，理想軌道 ϕ_r とその速度 $\dot{\phi}_r$ は統一した。まず，マニピュレータ手先位置の理想軌道は初期位置から目標位置までの直線軌道（約14[s]で目標位置に到達した後，目標位置に固定）とし，本体位置・姿勢の理想軌道は初期値に固定した。また，マニピュレータ手先位置の理想軌道の速度は，理想軌道の目標値到達まで台形状に設定した。そして，これらの理想軌道から逆運動学ならびに微分逆運動学アルゴリズム[25]を用いて理想軌道 ϕ_r とその速度 $\dot{\phi}_r$ を求めた。

まず，設計パラメータ α と制御性能の関係を調べる前に，提案法の基本性能を調べるシミュレーションを行った。ここでは，設計パラメータを $\alpha_{11}=\alpha_{12}=\alpha_{13}=\alpha_{14}=\alpha_{15}=5$, $\alpha_{21}=226.5$, $\alpha_{22}=545$, $\alpha_{23}=18.7$, $\alpha_{24}=4.37$, $\alpha_{25}=0.675$ とした（すなわち，$\alpha=0.675$）。なお，誤差モデル(9)第２式において，誤差の時間微分 $\dot{\mu}$ に慣性行列 $M(\cdot)$ が乗算されていることを考慮し，$A_2=\bar{M}_0A_1$ となるように設定している。ただし，$\bar{M}_0$ は初期値の慣性行列 $M(q(0))$ において対角要素以外の要素を０にしたものである。これは，誤差 μ の全要素で同程度の収束速度を得るためには，各要素に対応する部分（本体・リンク）の質量の違いを考慮しなければならないことを意味していると考えられる。この場合のシミュレーション結果をFig. 3 に示す。図の(a)はロボットの挙動，(b)は誤差 $\tilde{\phi}$ のノルムの時間変化である。図の(b)より，誤差が小さく抑えられていることがわかる。さらに，図の(a)より，本体位置・姿勢が初期状態に，マニピュレータ手先位置が直線の理想軌道に追従するよう制御されていることが読み取れる。

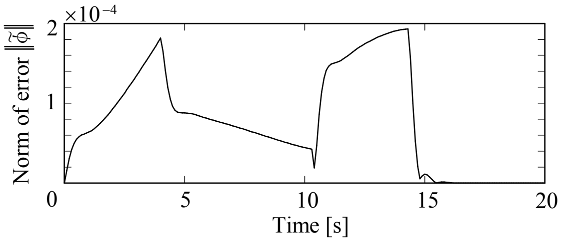
つぎに，設計パラメータ α と制御性能の関係を調べるため，α を大きくしていくシミュレーションを行った。比較を明瞭にするため，各シミュレーションにおいて α_{ij} はすべて同じ値に設定した（すなわち，$\alpha_{ij}=\alpha$）。α を 1，2.5，５と大きくしていったときの誤差 $\tilde{\phi}$ のノルムの時間変化をFig. 4 に示す。図において，α を大きくするほど誤差 $\tilde{\phi}$ のノルムの最大値が小さくなり，さらには各時点においても誤差が小さくなっていることが確認できる。

Table 1. Parameters of underwater robot manipulator

	Base	Link 1	Link 2
Mass [kg]	28.32	4.25	1.23
Volume [$\times10^{-3}$ m^3]	30.54	2.43	0.83
Moment of Inertia [kg m^2]	1.33	0.19	0.012
Length [m]	0.2×0.81	0.25	0.25
Width [m]	0.42	0.12	0.12
Added mass (x) [kg]	72.7	1.31	0.1
Added mass (y) [kg]	6.28	3.57	2.83
Added Moment of Inertia [kg m^2]	1.05	0.11	0.06
Drag coefficient	1.2	1.2	1.2



(a) Motion of underwater robot manipulator



(b) Tracking error $\|\tilde{\phi}\|$

Fig. 3. Simulation result.

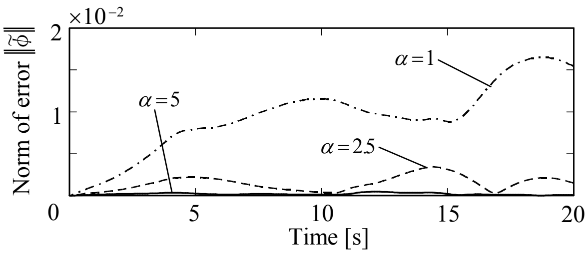


Fig. 4. Tracking error responses for α = 1, 2.5, 5.

おわりに

本報告では，水中ロボットマニピュレータに対し，時変フィードバックゲインを用いたロバスト制御法を提案した。提案法では，設計パラメータを大きく設定することにより，本体位置・姿勢およびマニピュレータ関節角度から構成される変数とその理想軌道の間の誤差のノルムの最大値を任意に小さくできることを理論解析および数値シミュレーションを用いて示した。なお，実機を用いた実験により，提案法の有用性を確認することが今後の課題である。

文　献

1）浦環：自律型海中ロボット．日本ロボット学会誌，18，933-936（2000）

2）浦環：海中工学におけるシステムインテグレーション．計測と制御，47，787-790（2008）

3）Scholberg I, Fossen T : Modelling and Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems. *Proc. 3rd Conf. Marine Craft Maneuvering and Control*, 45-57（1994）

4）Lizarralde F, Wen J T, Hsu L : Quaternion-Based Coordinated Control of a Subsea Mobile Manipulator with Only Position Measurements. *Proc. 34th IEEE Conf. Decision and Control*, 3996-4001（1995）

5）Kato N, Lane D M : Co-Ordinated Control of Multiple Manipulators in Underwater Robots. *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2505-2510（1996）

6）Sarkar N, Podder T K : Coordinated Motion Planning and Control of Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Drag Optimization. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 26, 228-239（2001）

7）Sagara S, Tanikawa T, Tamura M, Katoh R : Experiments on a Floating Underwater Robot with a Two-Link Manipulator. *Artificial Life and Robotics*, 5, 215-219（2001）

8）Sagara S, Shibuya K, Tamura M : Experiment of Digital RAC for an Underwater Robot with Vertical Planar 2-Link Manipulator. *Proc. Ninth Int. Symposium Artificial Life and Robotics*, 337-340（2004）

9）山本稔：常微分方程式の安定性．実教出版（1979）

10）Fossen T I : Adaptive Macro-Micro Control of Nonlinear Underwater Robotic Systems. *Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics*, 1569-1572（1991）

11）Antonelli G, Chiaverini S : Adaptive Tracking Control of Underwater Vehicle-Manipulator System. *Proc. 1998 IEEE Int. Conf. Control Applications*, 1089-1093（1998）

12）Antonelli G, Caccavale F, Chiaverini S : Adaptive Tracking Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Based on the Virtual Decomposition Approach. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 20, 594-602（2004）

13）Lee M, Choi H S : A Robust Neural Controller for Underwater Robot Manipulators. *IEEE Trans. Neural Networks*, 11, 1465-1470（2000）

14）Xu B,Abe S,Sakagami N,Pandian S R : A Robust Nonlinear Controller for Underwater Vehicle-Manipulator Systems. *Proc. 2005 IEEE / ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, 711-716（2005）

15）Xu G, Guo Y, Xiang X, Xiao Z : Motion Control and Computer Simulation for Underwater Vehicle-Manipulator Systems. *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Mechatronics and Automation*, 1368-1373（2007）

16）Khalil H K : Nonlinear Systems, Third Edition. Prentice Hall, 554-555（2002）

17）Hung J Y, Gao W, Hung J C : Variable Structure Control : a Survey. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 40, 2-22（1993）

18）Antonelli G, Chiaverini S : Singularity-Free Regulation of Underwater Vehicle-Manipulator Systems. *Proc. American Control Conf*, 399-403（1998）

19) Lee P M, Yuh J : Application of Non-Regressor Based Adaptive Control to an Underwater Mobile Platform-Mounted Manipulator. *Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Control Applications*, 1135–1140 (1999)

20) Sarkar N, Yuh J, Podder T K : Adaptive Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Joint Limits, *Proc. 1999 IEEE / RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, 142–147 (1999)

21) Yuh J, Zhao S, Lee P M : Application of Adaptive Disturbance Observer Control to an Underwater Manipulator. *Proc. 2001 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 3244–3249 (2001)

22) 藤本博志：マルチレートサンプリング制御とロボットへの応用．日本ロボット学会誌，27，410–413 (2009)

23) Antonelli G : Underwater Robots : Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems.Springer-Verlag (2003)

24) 大屋勝敬，小林敏弘：外乱を有する系に対するロバスト適応制御．計測自動制御学会論文集，28，1061–1070 (1992)

25) 吉川恒夫：ロボット制御基礎論．コロナ社，26 (1988)