

位置情報に雑音が含まれる水中ロボットシステムの微分逆運動学

森元映治[†], 平 雄一郎, 中村 誠

Differential Inverse Kinematics of Underwater Robotic Systems with Noise in Position Data

Eiji Morimoto[†], Yuichiro Taira and Makoto Nakamura

Abstract : This report deals with a control issue of an autonomous underwater robot equipped with a manipulator. In general, the control objective of manipulator is to determine joint torque inputs so that the position of end-effector can follow the desired trajectory. Since most joint torque controllers cannot directly control the end-effector variables, an inverse kinematics algorithm which transforms the desired trajectories of end-effector variables to those of joint variables needs to be used. This report focuses on a differential inverse kinematic algorithm using the Jacobian pseudo inverse. The position of end-effector may be measured by a visual sensor such as camera. It is anticipated that the measured position data includes measurement noise since the measurement is carried out in underwater environment. However, the effect of measurement noise on the control performance of joint torque controller using the differential inverse kinematic algorithm is not analyzed. In this report, a differential inverse kinematic algorithm of underwater robotic system with noise in position data is considered. The effectiveness of the algorithm is demonstrated by numerical simulation.

Key words : Fishery engineering, Underwater robot, Manipulator, Inverse kinematic algorithm, Noise

緒 言

魚介類行動生態調査、漁場における海底障害物・汚染源の除去作業などの海中作業を安全かつ効率的に行うため、海中ロボットの利用が期待されている¹⁾。このロボットには作業のために人間の腕・手に相当するマニピュレータが搭載されている必要がある。また、人件費などのコスト面や作業者の負担を考慮すれば、ロボットは自律的に作業を遂行する機能を備えていることが望ましい。本報告では、作業用マニピュレータを搭載した自律型水中ロボット（海中ロボットを含む）を対象とする。

水中ロボットに搭載されたマニピュレータの手先位置制御法は、これまで数多く提案されている²⁻⁹⁾。その大部分では、手先位置が理想軌道に追従するような関節トルク制御入力を設計することが目的である。関節トルク形式の制御入力は、一般に手先変数（手先位置・手先速度・手先加

速度）を直接的に制御することができないから、手先変数の理想軌道を、関節トルクで直接制御可能な関節変数（関節角度・関節角速度・関節角加速度）のものに変換する機構が制御系に付加されていなければならない。これに対し、陸上のマニピュレータと同様に、擬似逆行列（正方行列では逆行列）を用いて関節角速度の理想軌道を求める微分逆運動学アルゴリズム¹⁰⁾がよく用いられる。本報告では、この微分逆運動学アルゴリズムに注目する。

水中ロボットのような移動可能なロボット本体に搭載されたマニピュレータの手先位置の情報は、一般にカメラなどの視覚センサで計測される。このような水中における物体の計測では、破片・ゴミ・砂・気泡などの作業により発生する浮遊物、水流によるカメラのぶれなどにより、計測情報に誤差も含めた雑音成分が多く含まれることが予想される。そのため、手先位置の計測値に雑音成分が含まれるという条件で、微分逆運動学アルゴリズムを用いた制御系

2008年11月14日受付. Received November 14, 2008.

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): morimoto@fish-u.ac.jp

を解析する必要がある。

本報告では、手先位置情報に雑音成分が含まれる水中ロボットシステムに対し、微分逆運動学アルゴリズムを用いた制御系を数値シミュレーションにより解析する。さらに、雑音に対する対策として、微分運動学モデルから手先位置を推定する方法を考案し、その有用性を数値シミュレーション解析により確認する。

なお、マニピュレータを搭載した水中ロボットの制御に関する文献の大部分では、マニピュレータ手先位置と同時にロボット本体の位置・姿勢も制御する。そこで、本報告においてもこれを採用する。

方 法

微分運動学モデル

マニピュレータを搭載した水中ロボットの微分運動学モデルは次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\dot{x} = J(\phi_b, \phi_m) \dot{\phi} \quad (1)$$

ただし、 x は本体位置・本体姿勢角度・マニピュレータ手先位置から構成されるベクトル、 ϕ は本体位置・本体姿勢角度・マニピュレータ関節角度から構成されるベクトル、 ϕ_b は本体姿勢角度ベクトル、 ϕ_m はマニピュレータ関節角度ベクトル、 $J(\cdot)$ は係数行列(ヤコビ行列)である。また、変数上部の点(たとえば、 \dot{x})は時間微分を表す。

一般の微分逆運動学アルゴリズム

式(1)の微分運動学モデルに対し、擬似逆行列(正方行列では逆行列)を用いた微分逆運動学アルゴリズムは次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\dot{\phi}_r = J(\phi_b, \phi_m)^+ (\dot{x}_r - \alpha e) \quad (2)$$

ただし、 ϕ_r は ϕ の理想軌道、 x_r は x の理想軌道、 α は設計パラメータ(正のスカラ)であり、また、 $e = x - x_r$ である。さらに、右肩文字+は擬似逆行列を表す。設計パラメータ α は追従誤差 e の制御性能に影響を与えるものである。理論解析によれば、設計パラメータ α を大きくするほど、追従誤差 e の制御性能が良好になる¹⁰⁾。しかしながら、 x の計測値(すなわち、 e)に雑音成分が含まれるとき、設計パラメータ α を大きくすれば、式(2)の理想軌道 $\dot{\phi}_r$ において雑音成分が増幅され、逆に制御性能が劣化する可能性がある。このようなとき、制御応用分野では、追従誤差 e にフィルタあるいは不感帯を適用して対応する場合がある。

フィルタとして1次遅れ要素を適用する場合を考える。1次遅れ要素は角周波数 $1/T_f$ 以上の入力成分を減衰する

機能をもつことから、ローパスフィルタを代用するものとして用いられる(T_f は時定数)。ローパスフィルタは高い周波数の雑音の除去に有効であることが知られている。1次遅れ要素を付加した理想軌道 $\dot{\phi}_r$ を次式で構成する。

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_r &= J(\phi_b, \phi_m)^+ (\dot{x}_r - \alpha e_f) \\ e_{fi} &= \frac{1}{T_f s + 1} [e_i] \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 e_{fi} と e_i はそれぞれ、ベクトル e_f と e の第 i 要素であり、 s はLaplace演算子を表す。

不感帯を適用する場合を考える。不感帯は入力がある範囲内にあれば0を出力する要素である。追従誤差に雑音成分があるとき、(雑音を除いた)真の信号成分がたとえ0であっても、追従誤差は0に落ち着かず小刻みに変動し、制御性能に影響を及ぼす可能性がある。このような場合に不感帯が有効であることが知られている。不感帯を付加した理想軌道 $\dot{\phi}_r$ を次式で構成する。

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_r &= J(\phi_b, \phi_m)^+ (\dot{x}_r - \alpha e_d) \\ e_{di} &= \begin{cases} e_i - L_d & e_i \geq L_d \\ 0 & |e_i| < L_d \\ e_i + L_d & e_i \leq -L_d \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 e_{di} と e_i はそれぞれ、ベクトル e_d と e の第 i 要素、 L_d は不感帯の範囲を指定する設計パラメータである。

推定位置を用いる微分逆運動学アルゴリズム

式(1)の微分運動学モデルより、 \dot{x} は ϕ 、 $\dot{\phi}$ および幾何学パラメータ(ロボットの長さ)を用いて求められる。さらに、その \dot{x} を時間積分すれば x が得られる。信号 ϕ 、 $\dot{\phi}$ は水中ロボットシステムにおいて一般に利用可能な信号であり、また、幾何学パラメータは事前の測定により精度よく求められると考えられる。そこで、式(1)の微分運動学モデルを用いて x の推定値 \hat{x} を求め、その推定値を用いた微分逆運動学アルゴリズムを考える。推定値 \hat{x} を用いた理想軌道 $\dot{\phi}_r$ を次式で構成する。

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_r &= J(\phi_b, \phi_m)^+ (\dot{x}_r - \alpha \hat{e}) \\ \hat{e} &= \hat{x} - x_r \\ \dot{\hat{x}} &= J(\phi_b, \phi_m) \dot{\phi}, \hat{x}(0) = x(0) \end{aligned} \quad (5)$$

なお、 x の初期値 $x(0)$ は正確に測定される(雑音成分を含まない)ものとする。

結果と考察

ここでは、微分逆運動学アルゴリズムを用いた制御系に対する数値シミュレーション解析の結果を示す。シミュレーションでは、文献12)で構築した2次元2リンクマ

ニピューレータを搭載した水中ロボットのシミュレーションシステムに、微分逆運動学アルゴリズムを含めたコントローラ部分を追加したシステムを用いた (Fig. 1 参照)。なお、本報告では、水中ロボットの体積パラメータを文献 [12] と違う値に設定している (本体: $30.54 \times 10^{-3} [m^3]$, 第1リンク: $2.43 \times 10^{-3} [m^3]$, 第2リンク: $0.83 \times 10^{-3} [m^3]$)。このシミュレーションの目的は微分逆運動学アルゴリズムの解析であるため、本体ならびにマニピュレータを駆動するコントローラには簡単なPIコントローラを用いた。また、理想軌道 x_r に関して、手先位置に対応する要素は初期位置から目標位置までの直線軌道 (約12[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・姿勢に対応する要素は初期値に固定した。以下のシミュレーションでは、各手法の比較を公正にするため、コントローラおよび理想軌道の設計パラメータを同じ値に設定した。

雑音が存在しない場合の基本性能

まず、手先位置に雑音が存在しないという条件で、式 (2) のアルゴリズムを用いた制御系の性能を調べた。設計パラ

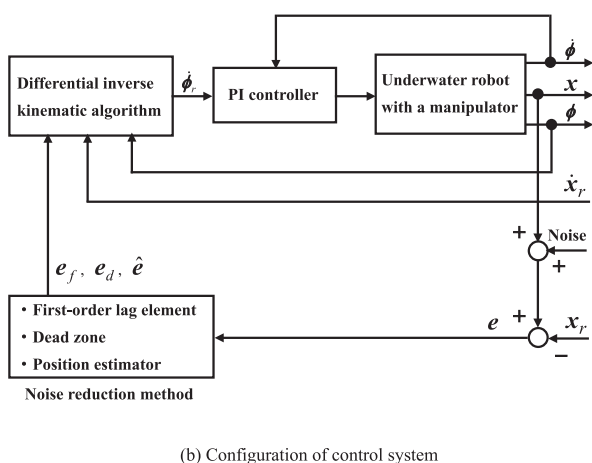
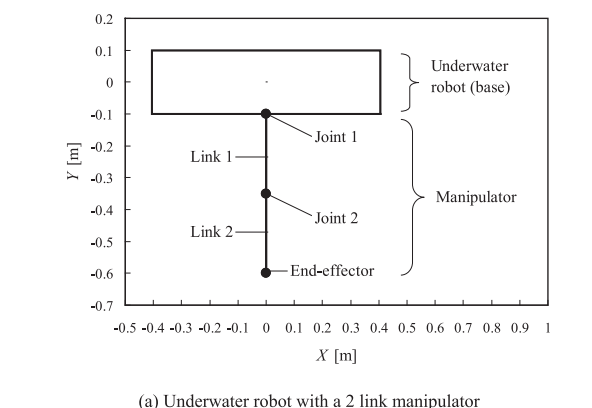


Fig. 1. Simulation system for underwater robot

メータ α を 1, 2, 3 と大きくしていったときの手先位置に関する追従誤差 (すなわち、本体位置・姿勢の要素を除いた e) のノルムの時間変化を Fig. 2 に示す。図より、設計パラメータ α を大きくするほど追従誤差が抑制され、制御性能が改善されていることがわかる。したがって、コントローラの実装では、基本的に設計パラメータ α を大きくした方がよいといえる。

雑音の影響の解析

つぎに、手先位置情報に含まれる雑音成分が式 (2) のアルゴリズムを用いた制御系に及ぼす影響を調べた。シミュレーションで雑音を実現するため、平均値が 0 である正規分布の乱数を用いた。正規分布の標準偏差は、手先理想軌道の x, y 成分 (絶対値) の最大値を 100 としたときの百分率で与えた。代表例として、雑音の標準偏差が 0.5 [%] の場合のシミュレーション結果を Fig. 3 に示す。図の (a), (c) は (比較のために示した) 雑音が存在しない場合の結果、(b), (d) は雑音が存在する場合の結果である。また、図の (a), (b) はロボットの挙動、(c), (d) はマニピュレータのみの理想軌道 $\dot{\phi}_r$ (すなわち、ロボット本体の要素を除いた $\dot{\phi}_r$) である。設計パラメータは $\alpha = 1$ とした。さらに、このときの手先位置に含まれる雑音の状態をわかりやすくするため、手先位置の x, y 成分の時間変化を Fig. 4 に示している。Fig. 3 の (a), (b) より、ロボットの大局的な動作に雑音の影響は見受けられない。一方、Fig. 3 の (c), (d) より、雑音が存在する場合の理想軌道 $\dot{\phi}_r$ は小刻みな変動を伴っており、理想軌道に雑音の影響が明確に現れている。このような理想軌道であれば、Fig. 3 の (b) の手先位置の軌跡にも小刻みな変動が見受けられてもよさそうである。そのようになっていない理由としては、水中ロボットの応答速度では Fig. 3 の (d) のような小刻みに変動する速度変化に対応できないからであると考えられる。すなわ

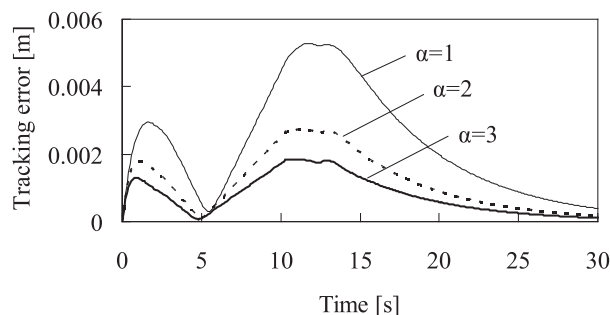
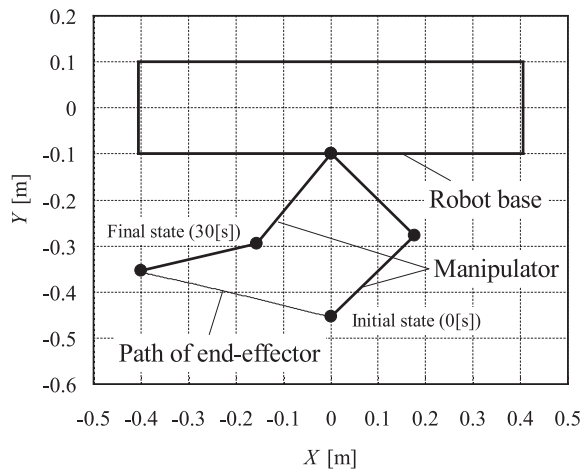
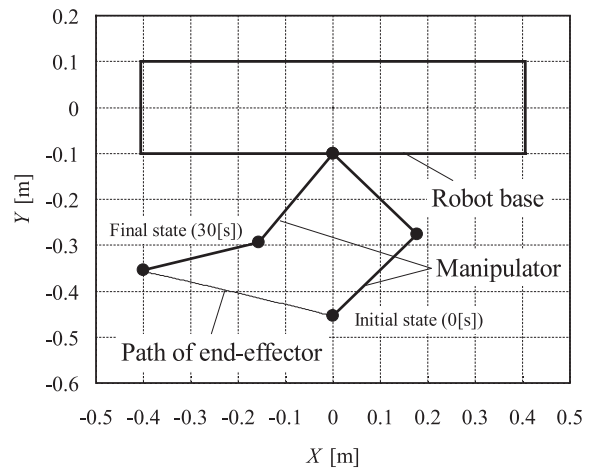


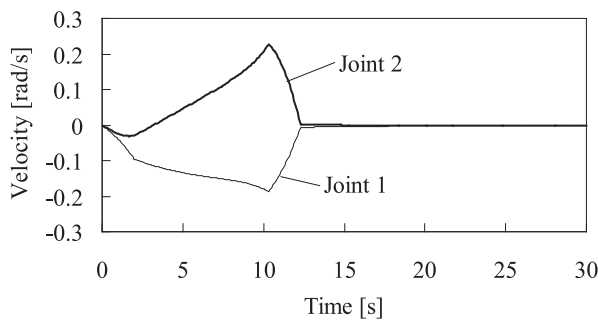
Fig. 2. Effect of a design parameter on control performance without noise



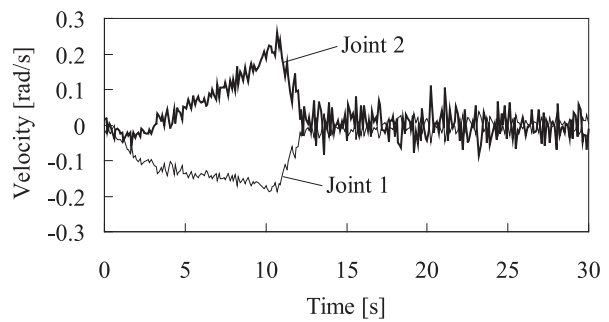
(a) Robot motion without noise



(b) Robot motion with noise



(c) Desired trajectory without noise



(d) Desired trajectory with noise

Fig. 3. Effect of noise on control system

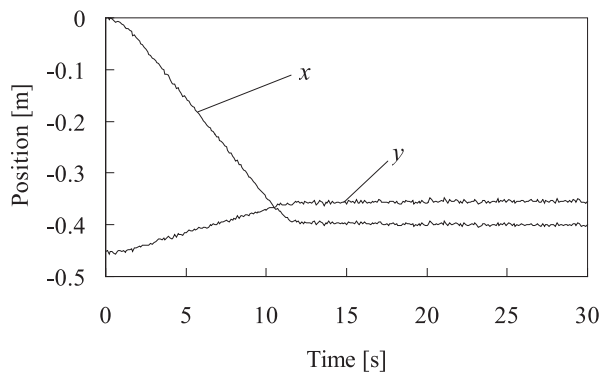


Fig. 4. Time history of end-effector position with noise

ち、水中ロボットはFig. 3の(d)の目標速度を忠実に実現できていないと考えられる。しかしながら、実システムでは、マニピュレータの各関節はアクチュエータ（一般に、電動モータ）で駆動され、アクチュエータにFig. 3の(d)

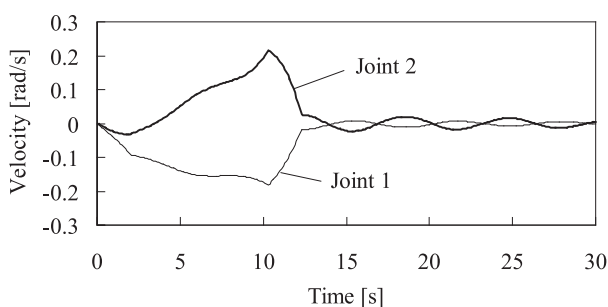
のような小刻みに変動する速度指令がコントローラを介して与えられる。このような速度指令をアクチュエータに与えれば、アクチュエータは微小振動し、それに伴ってマニピュレータ関節部分に微小振動が生じることが予想される。このような動作はアクチュエータに多大な負担をかけ、故障の原因にもなるから、アクチュエータへの指令値は一般に滑らかに変化するものが好まれる。さらに、マニピュレータ関節部分の微小振動は、ロボット本体に搭載された通信装置ならびに計測装置（カメラ）の通信・計測に影響を及ぼす可能性がある。ここでは、雑音の標準偏差が0.5[%]、設計パラメータが $\alpha = 1$ の場合の結果を示しているが、標準偏差または α を大きくするほど、理想軌道 ϕ において雑音による変動が大きくなることが確認された。

以上の解析結果からすれば、手先位置に含まれる雑音は大局的なロボットの動作に大きな影響を与えないが、局所的にはマニピュレータ関節部分の微小振動の原因になると

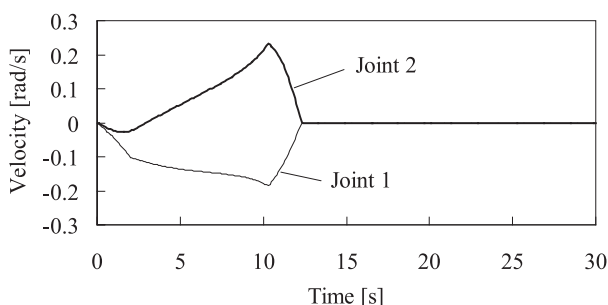
考えられる。また、設計パラメータ α を大きくするほど雑音の影響が大きくなることから、 α を大きくして制御性能を改善することは困難である。したがって、式(2)のアルゴリズムを用いた制御系において、雑音に対する対策が必要であるといえる。

雑音対策の比較

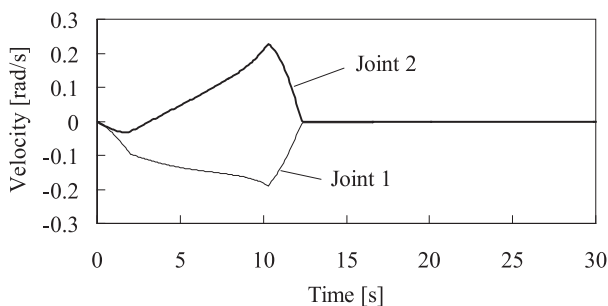
ここでは、雑音対策を行った式(3)~(5)のアルゴリズムを用いた制御系の性能を比較した。比較を公正にするため、すべてのアルゴリズムにおいて共通なパラメータである、雑音の標準偏差を0.5[%]、設計パラメータ α を10に統一した。一方、個別のパラメータである設計パラメータを $T_f=10$ 、 $L_a=0.05$ に設定した。なお、 T_f ならびに L_a の



(a) Algorithm with Eq. (3)



(b) Algorithm with Eq. (4)



(c) Algorithm with Eq. (5)

Fig. 5. Time histories of desired trajectory using equation (3) to (5)

選定には、雑音による小刻みな変動が理想軌道 $\dot{\phi}_i$ に生じないことを基準にした。

シミュレーション結果である理想軌道 $\dot{\phi}_i$ (マニピュレータのみ)の時間変化をFig. 5に示す。図の(a)~(c)は式(3)~(5)のアルゴリズムに対するものにそれぞれ相当する。式(3)~(5)のすべてのアルゴリズムにおいて、雑音による影響(小刻みな変動)が除去されていることがわかる。なお、図から読み取りにくい、式(4)の理想軌道(図(b))は12.4[s]以降に(完全に)0であるのに対し、式(5)の理想軌道(図(c))は(小さい値であるが)0にはなっていない。さらに、手先位置に関する追従誤差(すなわち、本体位置・姿勢の要素を除いたもの)のノルムの時間変化をFig. 6に示す。図より、式(3)、(5)と比較して式(4)のアルゴリズムの追従誤差がかなり大きいことがわかる。式(4)のアルゴリズムは、追従誤差の各要素が範囲 $(-L_a, L_a)$ にある場合に(雑音成分として)完全に0とみなす手法であるが、この結果からすれば、雑音成分のみならず真の信号成分も範囲 $(-L_a, L_a)$ に含まれていたと考えられる。なお、本報告には載せていないが、式(4)のアルゴリズムではロボット本体の姿勢の追従誤差も大きくなっていったことから、Fig. 6の追従誤差にはロボット本体の変動分が含まれていると考えられる。そのため、手先位置の追従誤差がこのように大きな値になったと推測される。さらに、Fig. 6より、式(3)、(5)のアルゴリズムの結果を比較したとき、式(5)の追従誤差の方が小さいことが読み取れる。式(3)のアルゴリズムにおいて適用された1次遅れ要素は、追従誤差における雑音成分のみならず真の信号成分の一部も減衰させていると推察される。以上より、このシミュレーションでは、推定位置を用いる式(5)のアルゴリズムの制御性能が最良であることが確認された。

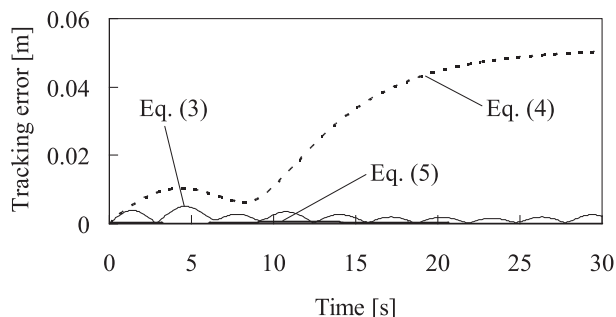


Fig. 6. Control performance of algorithms using equation (3) to (5)

結 言

本報告では, マニピュレータ手先位置情報に雑音成分が含まれる水中ロボットシステムに対する微分逆運動学アルゴリズムを用いた制御系を解析した。まず, 手先位置に含まれる雑音が制御系に及ぼす影響を数値シミュレーションにより解析した。その結果, 雑音は理想軌道(本体速度・本体姿勢角速度・マニピュレータ関節角速度)に小刻みな変動を発生させることがわかった。さらに, 雑音の影響のため, 設計パラメータによる制御性能の改善が困難であることがわかった。つぎに, 雑音に対する対策として, 微分運動学モデルから手先位置を推定する方法を考案した。そして, この方法と一般的な雑音対策(1次遅れ要素を適用する方法ならびに不感帯を適用する方法)を比較する数値シミュレーションを行い, 本報告で考案した手先位置を推定する方法の方が有用であることが確認された。

文 献

- 1) 浦環, 高川真一: 海中ロボット. 成山堂 (1997)
- 2) Mahesh H, Yuh J, Lakshmi R: A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robotic Manipulator. *Journal of Robotic Systems*, 8, 339-370 (1991)
- 3) 足達康行, 吉田和夫: 外乱補償制御法を用いた水中浮遊ロボットの運動制御. 日本機械学会論文集 (C編), 60, 3446-3451 (1994)
- 4) 加藤直三, Lane D M: 水中ロボットの多腕協調制御. 日本造船学会論文集, 178, 675-684 (1995)
- 5) Antonelli G, Caccavale F, Chiaverini S, Villani L: Tracking Control for Underwater Vehicle-Manipulator Systems with Velocity Estimation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 25, 399-413 (2000)
- 6) Lee M, Choi H S: A Robust Neural Controller for Underwater Robot Manipulators. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11, 1465-1470 (2000)
- 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) Sarkar N, Podder T K: Coordinated Motion Planning and Control of Autonomous Underwater Vehicle-Manipulator Systems Subject to Drag Optimization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 26, 228-239 (2001)
- 9) 坂上憲光, 川村貞夫: 時間軸変換を利用した水中ロボットマニピュレータのフィードフォワード入力生成. 日本ロボット学会誌, 21, 562-568 (2003)
- 10) Sciavicco L, Siciliano B: Modelling and Control of Robot Manipulators, Second Edition. Springer-Verlag, 105-106 (2000)
- 11) Antonelli G: Underwater Robots Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Springer-Verlag (2003)
- 12) 森元映治, 平雄一郎, 中村誠: MATLABを用いた水中ロボットシミュレーションシステムの開発. 水大校研報, 56, 33-37 (2007)