

日本大学理工学部
理工学研究所

研究ジャーナル

第120号

一般論文

人間のクロス・オーバー・モデルを考慮したモデル内蔵型力覚提示システムと
マスター・スレーブの制御
..... 川幡 長勝, 西澤 正紀, 伊藤 陽一郎, 吉田 洋明 1

総合論文

Real-time Visualization of Multiphase Flow by Means of Electrical Process Tomography
..... Je-Eun CHOI, Tong ZHAO and Masahiro TAKEI 11

平成22年3月

理工学研究所研究ジャーナル編集委員会

委員長	澤	口	孝	志	物質応用化学科
副委員長	安	田	邦	男	航空宇宙工学科
委員	中	村	正	彰	一般教育
〃	前	野	賀	彦	土木工学科
〃	伊	澤		岬	社会交通工学科
〃	小	野	清	秋	機械工学科
〃	藤	川	和	男	量子科学研究所
〃	宇	杉	和	夫	建築学科
〃	入	江	寿	弘	精密機械工学科
〃	大	貫	進	一郎	電気工学科
〃	大	月		穰	物質応用化学科
〃	田	所	辰	之助	短大・建設学科
〃	佐	藤	信	治	海洋建築工学科
〃	高	橋		聖	電子情報工学科
〃	二	瓶	武	史	物理学科
〃	笠	川	良	司	数学科
〃	島	村	秀	雄	研究事務課
幹事	土	屋	玲	子	研究事務課
〃	若	楨	智	也	研究事務課

人間のクロス・オーバー・モデルを考慮した モデル内蔵型力覚提示システムとマスター・スレーブの制御

川幡 長勝^{1*}, 西澤 正紀², 伊藤 陽一郎³, 吉田 洋明¹

Force Display and Bi-Lateral Master-Slave Control with an Internal Model under the Consideration of Human Cross-Over Model

Nagakatsu KAWAHATA, Masanori NISHIZAWA, Youichirou ITOH and Hiroaki YOSHIDA

Abstract

Human behavior for controlling machines is quite adaptive but restrictive in gain, phase, frequency bandwidth and so on. It is often assumed by a cross-over model especially for compensatory tracking task. Force display system is increasingly important in robotics, remote manipulations, machine handling and etc. The control system design for force display and/or bi-lateral master-slave manipulator is not so easy because of gain limits, mechanical vibration, human-induced oscillation and others. Proposed is a control system design for force display and/or bi-lateral master-slave manipulator based on model-following control under the concept of human cross-over model in compensatory tracking. Experimental results are also shown for an actual force display device designed by the proposed method.

Keywords: Force Display, Master-Slave, Manipulator, Cross-Over Model, Model-Following Control

1. はじめに

近年、ロボティクスの発達によって従来にもましてマスター・スレーブなどを用いた遠隔操作が盛んに利用されるようになって来たばかりでなく、今後益々の発展が予想される。その操作においては架空の操作環境が重視されて視覚や聴覚の転送が行われているが、力の転送は余り普及しているようには見えない。力の転送はバイラテラル・マスター・スレーブとして古くから研究されて来たが、比較的高価で技術的に難しい面もあった。しかしながら、遠隔手術や危険地域での高精度作業では、遠隔転送された力を力覚提示システムやマスター・スレーブ・システムによって正確に表現することが必要不可欠になりつつある。

力制御は古くから幾多の研究がなされ、様々な文献や専門書¹⁾⁻⁸⁾などに述べられている。文献⁶⁾には手際よくその全体がまとめられている。中でも横小路・吉川⁴⁾は理想的なバイラテラル・マスター・スレーブを実現するにはマスターおよびスレーブの加速度を測定

することが不可欠であることを示した。また、古田ら⁷⁾は仮想内部モデルを利用して力覚提示を実現する極めて有効な方法を提案した。実際には、極めて軽いバネ定数 ≈ 0 のような状態から、壁のようなバネ定数が極めて大きい状態に突入するような力と変位の関係を提示しようとする、機械的遊びやゲイン限界などで装置が振動することが多く、力・位置の提示精度を下げるを得ない場合がある。この接触安定の問題については例えば榊ら⁸⁾の研究がある。

本論文の目的は力覚提示やマスター・スレーブにおいて、操縦し易い様に人間の適応能力を反映したクロス・オーバー・モデル^{10),11)}を考慮すると共に、動的な力の提示精度を向上するためにII型の内部モデルを導入し、それをモデル・フォロイングによって実現する方法を提案する。この方法は古田ら⁷⁾の手法と同様に内部モデルを導入するが、規範モデルの構成や入力の方など色々と工夫されており、結果的に操作し易く、安定した高精度の力・位置関係を提示できる。初めに力覚提示装置が備えるべき条件を検討し準理想

¹ 日本大学理工学部精密機械工学科, ² 富士電機(株), ³ 榊森精機製作所

* Corresponding author

Received 21 October 2009, Accepted 11 March 2010

的なマニピュレータの伝達関数を導出する。第3章ではモデル・フォロイング手法によってそのシステムの設計を行う。第4章ではヒューマン・イン・ザ・ループとしてのクロス・オーバー・モデルについて述べる。5章は静的・動的実験結果を述べ、精度良く力覚提示が出来ていることを示す。第6章は本手法のバイ・ラテラル・マスター・スレーブ・システムへの応用について述べ、最後は結論である。

2. システムの表現と理想的モデル

簡単のために一次元の力覚提示システムを考えることとし、60Wのエンコーダ付DCモータにリード1[mm]のボールねじを直結してFig.1のような装置を製作した。その機能はFig.2のブロック線図で表現できる。多次元システムに対しては、多軸干渉があったとしても後に述べるモデル追従制御におけるモデルを工夫（非干渉化モデルなど）することによって、この一次元システムを簡単且つ自然に拡張して利用できる。操作器の位置を $x(t)$ 、ダンピング係数を b 、モータの入力電圧を $u(t)$ 、人間が加えている力を $f_{ha}(t)$ 、システムの有効質量を m とすればFig.1の装置の運動方程式は次式となり

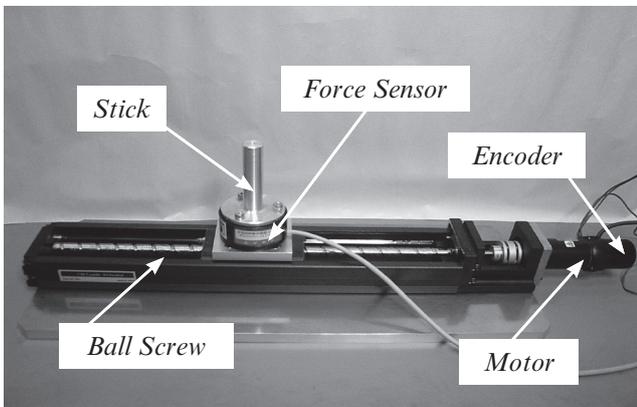


Fig.1 Force Display Device

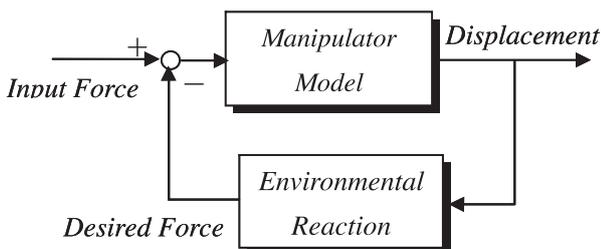


Fig.2 Functional Block Diagram of One-D Force Display Device

$$\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) = K_A u(t) + \frac{1}{m} f_{ha}(t) = v(t) \quad (1)$$

状態空間で表現すれば次のように書ける。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\dot{x}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} v(t) \quad (2)$$

$$y(t) = (1 \ 0)x(t) ; \mathbf{x}(t) \equiv (x(t) \ \dot{x}(t))^T \quad (3)$$

記述の簡略化のため、紛らわしくない限りは独立変数の表現“(t)”を省略し、システムの係数行列をまとめて $[A, b, c]$ と記述する。

一般にマスター・マニピュレータや力覚提示装置の役割は所望の位置だけでなく、高精度で所望の反力を表現することである。マニピュレータは勿論容易に操作出来なければならない。簡単のために、提示すべき力が変位に比例した力（例えばバネ）である場合を考える。人間がマニピュレータにある変位を与える時、変位に応じて計算された仮想バネの反力（提示すべき力）と人間の加えた力が、変位の速度・加速度に関わらず同じにならねばならない。その為には装置の慣性や粘性を打ち消さなければならず、その実現は極めて困難である。そこで、実現可能な準理想的な力覚提示システムとして最低限満たすべき条件を挙げてみると、以下のようである。

(1) 仮想現実の反力（目標力）はマニピュレータの変位に応じて算出されるので、理想的なマニピュレータは、人間の印加力（入力）と表現しようとする目標力の誤差を小さくするように動く（変位する）のが良い。即ち、Fig.2のようなフィードバック系になる。

(2) 理想的なマニピュレータにダイナミクスは必要で無いのが普通で、慣性やダンピングは出来るだけ小さいのが良い。

(3) 提示すべき力がステップ状、あるいはランプ状に変化する時でも定常誤差が残らない方が良い。即ちII型のシステムが望ましい。

(4) 最も基本的な環境であるバネのような力覚提示において、バネの剛さに係わらずシステムが安定となるべきである。そのためには提示すべき環境反力の単純フィードバックでマニピュレータのTotal System Damping（極の和）が容易に変わるように、理想的なマニピュレータ・モデルの相対次数は“1”であることが望ましい。e.t.c.

上記のような要求から準理想的なマニピュレータとして次の特性を考える。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon m_m \ddot{x}_m &= (f_h - f_d) + T_{f1} \frac{d}{dt} (f_h - f_d) \\ \frac{X_m(s)}{\Delta F(s)} &= \frac{T_{f1}}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{s + \frac{1}{T_{f1}}}{s^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$= -\frac{T_{f1}}{T_b} z + \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b}\right) (f_h - f_d) \quad (6)$$

今, $z_m \equiv [z_{m1}, z_{m2}, z_{m3}]^T = [x_m, \dot{x}_m, z]^T$ なる状態ベクトルを定義すれば準理想的なマニピュレータは次式で表現される.

m_m はモデルの架空質量, x_m はモデル把持部の架空変位, $f_d(t)$ は提示すべき目標力, $f_h(t)$ は人間が印加した力 $f_{ha}(t)$ の測定量で, 実際には $f_h(t) = f_{ha}(t)$ である. T_{f1} は適当な時定数, $\Delta F(s)$ は提示された力の誤差 $\Delta f(t) \equiv f_h(t) - f_d(t)$ のラプラス変換 $\mathcal{L}(\Delta f(t))$ である. 理想的には $\Delta f(t) = 0$ あるいは $T_{f1} \dot{\Delta f}(t) + \Delta f(t) = 0$ となるのが望ましいが, 任意の変位・速度・加速度に対してこれを満足させることが難しいので, 僅かな慣性を介して変位と力の提示誤差を関係付けている. 装置の動きが加速度運動ではなく一定速度に近ければ (4) 式の左辺は零となるので力の提示誤差が時間と共に消滅することを示し, また, システムが加速度を持って動く時でも力の提示誤差 $\Delta f = f_h - f_d$ が小さくなるように, 左辺の ε はできるだけ小さいのが望ましいことになる.

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_{m1} \\ \dot{z}_{m2} \\ \dot{z}_{m3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\varepsilon m_m} \frac{T_{f1}}{T_b} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{m1} \\ z_{m2} \\ z_{m3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{\varepsilon m_m} \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b}\right) \\ \frac{1}{T_b} \end{pmatrix} \Delta f \quad (7)$$

$$y_m = (1 \quad 0 \quad 0) (z_{m1} \quad z_{m2} \quad z_{m3})^T \quad (8)$$

しかしながら, (1)(2) 式で表される相対次数が “2” のプラントを相対次数が “1” の準理想的マニピュレータ (4) になる様な制御系は, 実質的にプラント入力 $v(t)$ の微分が必要となる. そこで, 力の提示誤差の微分が, 人間が操作するような低周波でだけで実現されるように, 伝達関数が $\frac{\Delta \dot{F}(s)}{\Delta F(s)} \cong \frac{s}{T_b s + 1}$ となるような近似微分 ($\Delta \dot{F}(s)$) を導入する. この実現は以下のように書ける.

このシステムの係数行列をまとめて $[A_m, b_m, c_m]$ とも記述する. 伝達関数は,

$$\frac{Y_m(s)}{\Delta F(s)} \equiv \frac{X_m(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{(T_{f1} + T_b)s + 1}{s^2(T_b s + 1)} \quad (9)$$

となり, 準理想的マニピュレータの伝達関数の相対次数は “1” ではなく “2” となり, プラントの相対次数と同じになるだけでなく, T_b を比較的小さく選べば色々な環境ばね剛性 (実質的なフィードバック・ゲイン) に対する十分な安定性が得られる (後述, Fig. 5).

$$\left. \begin{aligned} \dot{z} &= -\frac{1}{T_b} z + \frac{1}{T_b} \Delta f \\ \Delta \hat{f} &= -\frac{1}{T_b} z + \frac{1}{T_b} \Delta f \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに, $\Delta \hat{f}$ は $\Delta f = f_h - f_d$ の近似微分である. この近似微分を利用してマニピュレータの理想的モデル (4) を書き直すと次式になる.

問題は, (1) あるいは (2) で表現される力覚提示装置の出力位置 $y(t) (= x(t))$ が任意の $\Delta f(t)$ について準理想的マニピュレータ (9) の出力位置 $y_m(t) (= x_m(t))$ と等しくなる様に装置入力 $v(t)$, 即ち, モータの入力 $u(t) \left(\equiv \frac{1}{K_{Am}} v(t) - \frac{1}{K_{Am} m} f_{ha}(t) \right)$ を設計することである. これには, 単なる PID 制御での実現は困難であるので, (9) を内部モデルとした 2 自由度制御系かモデル追従制御系の設計手法を利用する必要がある. ここでは後者の手法を適用する.

$$\begin{aligned} \varepsilon m_m \ddot{x}_m &= (f_h - f_d) + T_{f1} \Delta \hat{f} \\ &= \Delta f + T_{f1} \left(-\frac{1}{T_b} z + \frac{1}{T_b} \Delta f \right) \end{aligned}$$

3. モデル追従のための制御則

出力行列を $c = [1 \ 0]$, $c_m = [1 \ 0 \ 0]$ として, マニピュレータの位置 $y(t) (= x_1(t) \equiv x(t))$ がモデルの位置 $y_m(t) (= z_{m1}(t) \equiv x_m(t))$ に追従するような制御則を文献 [9] の方法によって求める. 式 (2) (3) の力覚提示装置の係数行列 $[A, b, c]$, 式 (7) (8) で表現したモデルの係数行列を $[A_m, b_m, c_m]$ として, 出力誤差を順次微分して誤差ダイナミクスを求めると以下のようになる.

$$\begin{aligned} e_1 &= cx - c_m z_m = x_1 - z_{m1} \equiv x - x_m \\ \dot{e}_1 &= cAx - c_m A_m z_m = x_2 - z_{m2} \equiv \dot{x} - \dot{x}_m \triangleq e_2 \\ \dot{e}_2 &= cA^2 x + b^* v - c_m A_m^2 z_m - b_m^* \Delta f \end{aligned}$$

ここに, $cA^2 = (0 \ -b)$, $b^* = cAb = 1$,

$$c_m A_m^2 = \left(0 \ 0 \ -\frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{T_{f1}}{T_b} \right)$$

$$b_m^* = c_m A_m b_m = \frac{1}{\varepsilon m_m} \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b} \right)$$

誤差ベクトル $e = (x - x_m \ \dot{x} - \dot{x}_m)^T$ を定義すれば

$$e = Mx - M_m z_m \equiv \begin{pmatrix} c \\ cA \end{pmatrix} x - \begin{pmatrix} c_m \\ c_m A_m \end{pmatrix} z_m,$$

上の \dot{e}_2 式右辺に $k^T e$ を加減すれば次式となる. ここに $k^T = (k_1 \ k_2)$ である.

$$\dot{e}_2 = -k^T e + \underline{cA^2 x + b^* v - c_m A_m^2 z_m - b_m^* \Delta f} + k^T e$$

文献 [9] に従って, 右辺下線部がゼロとなるように力覚提示の制御則 $v(t)$ を決める. 即ち,

$$\begin{aligned} v &= -b^{*-1} (cA^2 + k^T M)x + b^{*-1} (c_m A_m^2 + k^T M_m)z_m \\ &\quad + b^{*-1} b_m^* \Delta f \\ &\equiv -(k_1, k_2 - b)x + \left(k_1, k_2, -\frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{T_{f1}}{T_b} \right) z_m \\ &\quad + \frac{1}{\varepsilon m_m} \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b} \right) \Delta f \end{aligned} \quad (10)$$

人間の印加した力 $f_{ha}(t)$ とその測定値 $f_h(t)$ は等しいから, モータ入力 $u(t)$ は (1) 式から次の如く得られる.

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{K_A} v - \frac{1}{K_A m} f_{ha} \\ &\equiv -\frac{1}{K_A} [k_1 x + (k_2 - b)\dot{x}] + \frac{1}{K_A} [k_1 x_m + k_2 \dot{x}_m] \\ &\quad - \frac{1}{K_A} \cdot \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{T_{f1}}{T_b} z - \frac{1}{K_A} \cdot \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{T_{f1}}{T_b} z \\ &\quad + \frac{1}{K_A} \left[\frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b} \right) (f_h - f_d) - \frac{1}{m} f_h \right] \end{aligned} \quad (11)$$

非同次部分をゼロとした結果, 得られる誤差ダイナミクスは次のような同次微分方程式になる.

$$\begin{pmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

この誤差ダイナミクスが漸近安定となるようにベクトル $k^T = (k_1 \ k_2)$ を決めれば, 力覚提示の誤差 (Δf : モデルへの入力) の如何に係わらず, $e(t) \rightarrow 0$ (i.e., $x(t) \cong x_m(t)$) となって位置のモデル・フォロイングが達成される. そのブロック線図は Fig.3 のようになる.

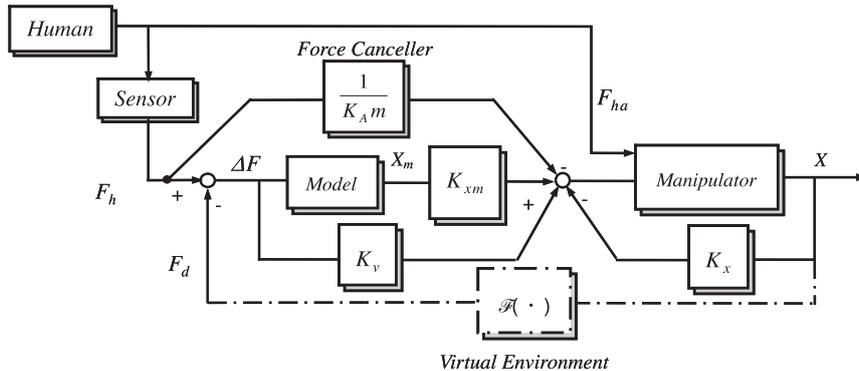


Fig.3 Block Diagram of Force Display System with Internal Model

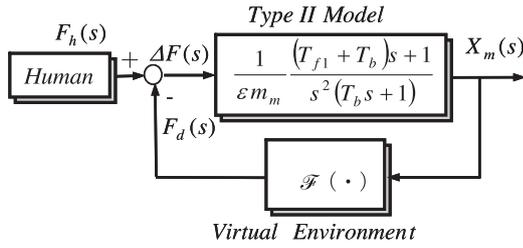


Fig.4 Essential Characteristics of Force Display

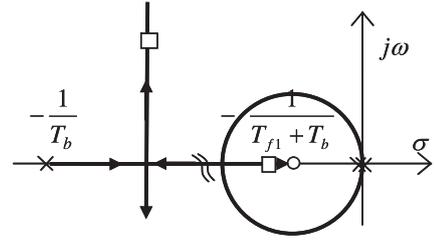


Fig.5 Root Locus for $\mathcal{F}(\cdot) / \epsilon m_m$

ここに、各ゲイン K_x, K_{xm}, K_v は (11) 式の第 3 辺でプラント状態変数 x 、モデル状態変数である x_m 及び z 、入力である力の提示誤差 $\Delta f = f_h - f_d$ に対する係数をまとめたものである。また、 $\mathcal{F}(\cdot)$ は如何なる F_d を提示するかによって決定される任意関数である。

(11) あるいは Fig.3 に見る如く、人間が実際に印加した力をモータ・トルクによって一旦消去してモデル・フォロイング系を実現し、提示された力の誤差 (Δf or ΔF) によってそれを駆動する形になっている。結果として、Fig.3 のブロック線図は、実際に加えている力 $f_{ha}(t)$ あるいは $F_{ha}(s)$ 及びそのキャンセラーを含めて、開ループが式 (9) のような II 型の伝達関数と等しくなるから、この力覚提示システムは実質的に Fig.4 のように集約される。この場合のフィードバック・ループ ($\mathcal{F}(\cdot)$) は仮想環境による反力に相当し、これを人間に感じさせねばならないが、一般には未知であるか任意である。例えば環境が単純バネの様なものとするれば、 $\mathcal{F}(\cdot)$ は単なるバネ定数で K_{SP} 、ループ・ゲインは $K_{SP} / \epsilon m_m$ に比例し、その根軌跡は概略 Fig.5 のようになるので、バネ定数の如何に係わらず、システムは安定であることが分る。バネ定数の変化範囲がある程度予想できるならば、 ϵm_m を適当に調節してループ・ゲイン ($K_{SP} / \epsilon m_m$) を適当な範囲に留めることが出来る。また、II 型の系であるが故にランプ入力に対しても定常誤差は残らず、動的な力の提示が可能である。

4. クロス・オーバー・モデル

結局、人間は式 (7), (8) あるいは (9) で表現されるような特性を持った力覚提示システムを操作することになる。そこで、ある程度任意の環境 ($\mathcal{F}(\cdot)$) フィードバックを伴った II 型システムを人間が操作できるかどうかの問題である。人間-機械系の研究は、20 世紀後半に精力的に行われ (文献 10), (11) など)、追跡補償制御 (Compensatory Tracking) における人間の特性として、有名なクロス・オーバー・モデル (Cross-Over Model) が提案された。本論文においても、力覚提示システムを人間-機械系と捉え、人間のクロス・オーバー・モデルが適用可能なように力覚提示装置のパラメータを調整できるか否かを検討する。

マニピュレータの位置を希望通りに操作したい (Compensatory Tracking) と願う人間の伝達関数が次式のような時間遅れを持った PID 制御で記述されるとする。換言すれば、これより難しい伝達関数を必要とする制御は難しいと言われる。

$$Y_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_d s \right) e^{-\tau s} \quad (13)$$

この時、力覚提示システム全体のブロック線図は Fig.4 を参照して位置フィードバックを加えれば Fig.6 のようになる。被制御要素 (Controlled Element) の伝

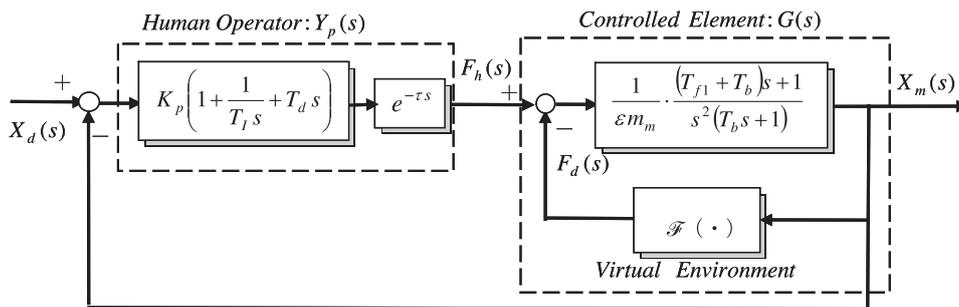


Fig.6 The Entire Block Diagram of Force Display System

達関数 $G(s)$ の特性は内部ループ・ゲイン $\mathcal{F}(\cdot)/\varepsilon m_m$ に依存するが、バネのようにダイナミクスや memory を持たない環境ならば、 $G(s)$ は一般に安定な 3 次系である (Fig.5). 人間の時間遅れ τ は略 0.1 ~ 0.2 [sec] であることが知られており、ここでは $\tau = 0.2$ [sec] と仮定する. クロス・オーバー・モデルでは、Fig.6 の一巡伝達関数 $Y_c(j\omega) = Y_p(j\omega)G(j\omega)$ がクロス・オーバー周波数 ω_c (略 1 ~ 2 [Hz]) 付近で Fig.7 のように $1/j\omega$ ($-20\text{dB}/\text{dec}$) になる様に人間が PID のゲインと時定数 (K_p , T_I 及び T_d) を調節すると考えられ、その調節の難易に応じて操作し易さの評価を行うとされている.

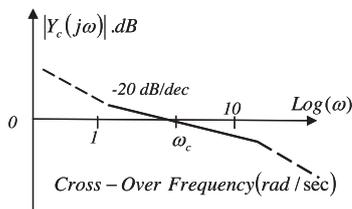


Fig.7 Cross-Over Model

Fig.6 のシステムにおいて、環境に触らない状態あるいは柔らかい環境の時 ($\mathcal{F}(\cdot) = 0$ or Small), T_b , T_{f1} を適当に選んでおけば人間は単なる比例制御 K_p のみでクロス・オーバー・モデルを実現でき、容易に操作可能である. しかしながら、硬い環境の時 ($\mathcal{F}(\cdot) = \text{Large}$) は比例制御 K_p のみ ((13) において $T_I = \infty$, $T_d = 0$) ではクロス・オーバー・モデルの条件を満たすことができない. この場合は、人間は比例制御を行わず、PI あるいは PID 制御によってクロス・オーバー・モデルを実現すると考えられる. 人間はこの PI あるいは PID のゲインと時定数がある範囲で容易に

設定できるか否かによって操作の難易を判定するので、被制御要素のパラメータである T_{f1} , T_b 及び εm_m を適当に選んでクロス・オーバー・モデルの条件を満たし易いようにせねばならない.

Fig.8 は Fig.6 のシステムで $\mathcal{F}(\cdot) = 50$ [N/m] の場合の一巡伝達関数の周波数特性を表しており、1 [Hz] 付近で所謂クロス・オーバー・モデルが実現されている. 色々な強さのバネ定数を持った環境 $\mathcal{F}(\cdot)$ について調べた結果 T_b をかなり小さく設定するのが良く、力微分の帯域幅を比較的広くする必要があることが分かった.

5. 力覚提示の実験

線形バネ、非線形バネおよび硬い壁、更にはヒステリシスの性質を持った環境について Fig.1 の装置を使って力覚提示の実験を行った. 静特性試験では極めて力の提示精度が高く、実質上殆ど誤差はないと思えるほどの性能を確認できた. ここまでに扱ったシステムは理想的なマニピレータ・モデルとして (4) 式で表される Type II モデルを基本としているが、比較のために Type I モデルを基本としたシステムについても同様のモデル追従法で力覚提示システムを設計し、比較実験を行った. Type I モデルは次式で与えられ、システム安定化のために力の微分は必要ではないので考慮されていない ((4) 式の Type II モデルと対比).

$$\varepsilon m_m (\ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m) = f_h - f_d \quad \text{or} \quad \frac{X_m(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{1}{s(s + b_m)} \quad (14)$$

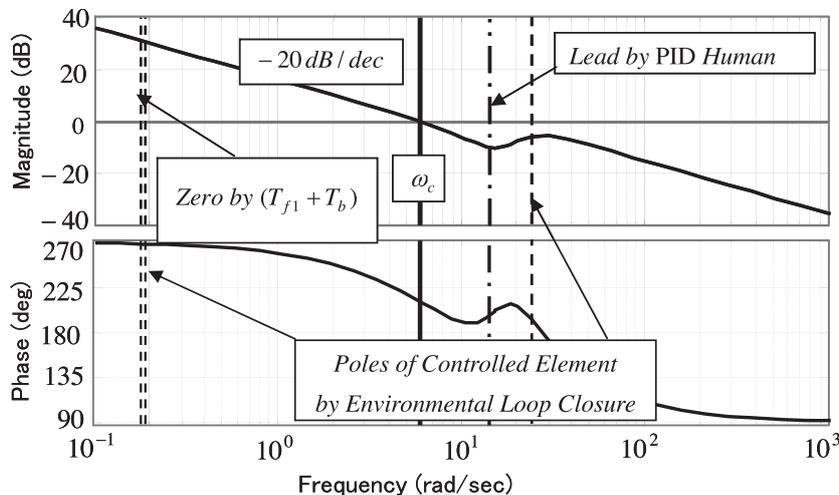


Fig.8 Achievement of Cross-over Model by PID Control

このときの制御則は同様の計算によって次式のように得られる。

$$u = -\left(\frac{k_1}{K_A}, \frac{k_2 - k_2}{K_A}\right)x + \left(\frac{k_1}{K_A}, \frac{k_2 - b_m}{K_A}\right)x_m + \frac{1}{\varepsilon m_m}(f_{ha} - f_d) - \frac{1}{K_A m} f_{ha} \quad (15)$$

予想されるように、静的特性試験では何れの環境に対しても Type I 方式は Type II 方式に勝るとも劣らない高精度の力覚提示を実現できた。次に、理想的モデルの Type I, II による違いを見る為に、動的性能試験を

行った。入力は人間が概ね±10[cm]の振幅を約6秒の周期で力覚提示装置を操作し、ダイナミックな入力を与えた。その結果を Fig.9 に示した。図中の左側 a) が Type II 方式、右側 b) が Type I 方式を表し、左右のスケールは比較のためにほぼ同じにしてある。その際の変位（横軸 [m]）に対して提示された力（実線）および所望の力（点線）を縦軸 ([N]) として Fig.9 の上段に示した。また、上段では見難い提示された力の誤差を拡大して下段に示した。非線形バネやその極端な場合としての壁についても同様の実験を行い、その結果を Fig.10, 11 に示した。

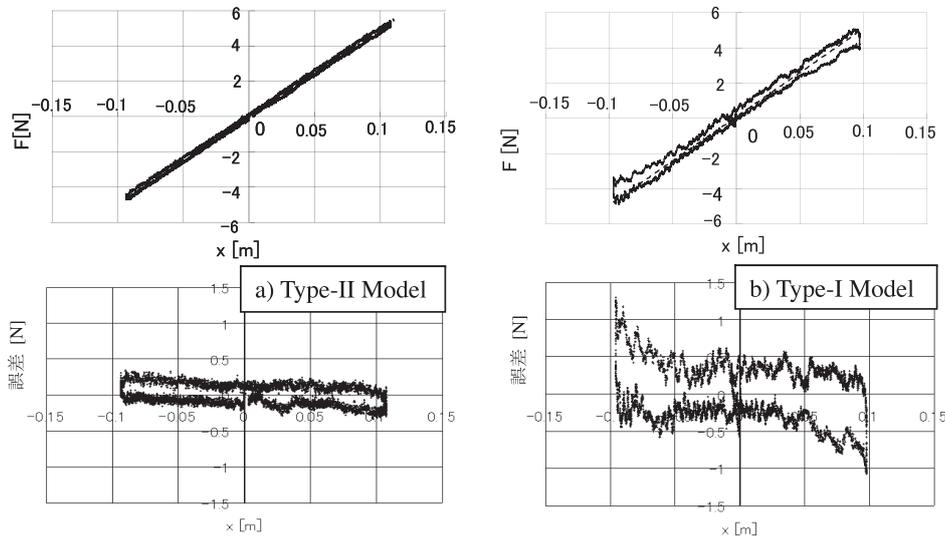


Fig.9 Dynamic Force Display of a Linear Spring (approximately 6 [sec/cycle])

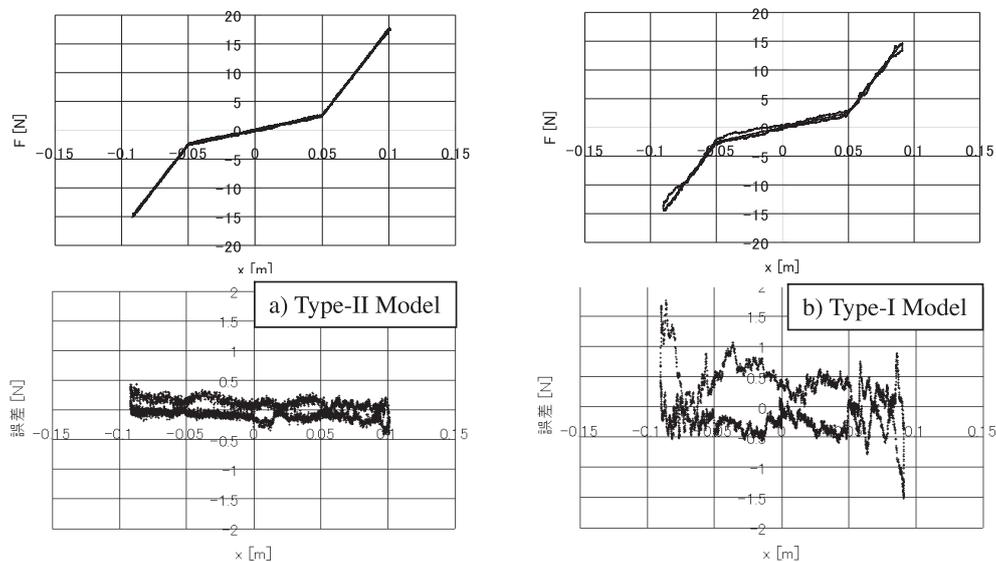


Fig.10 Dynamic Force Display of a Nonlinear Spring (approximately 6 [sec/cycle])

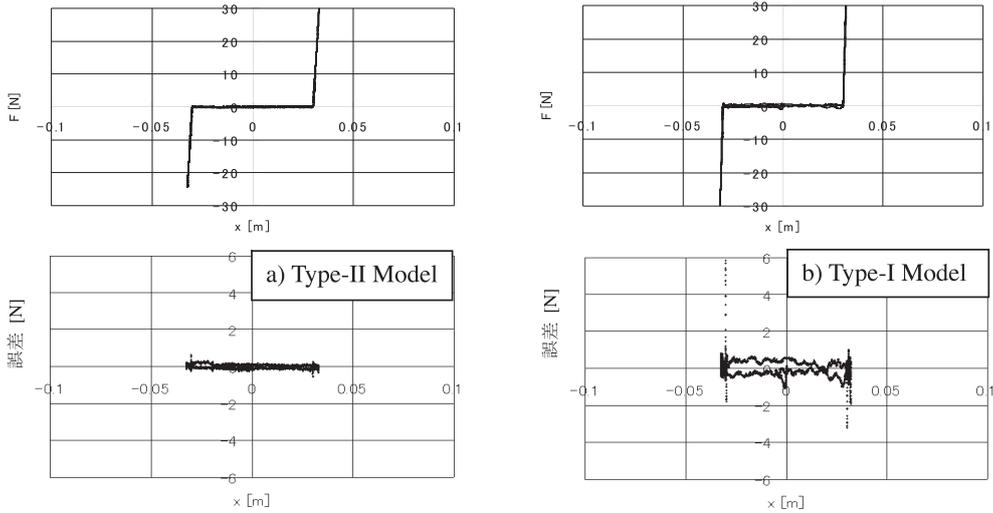


Fig.11 Dynamic Force Display of a Hard Wall (Approximately 6 [sec/cycle])

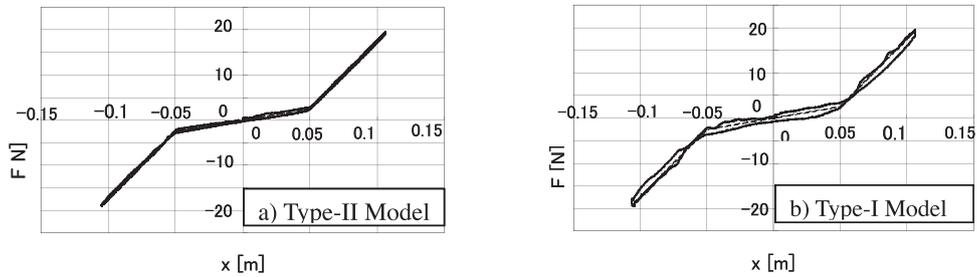


Fig.12 Dynamic Force Display of a Nonlinear Spring (Approximately 4 [sec/cycle])

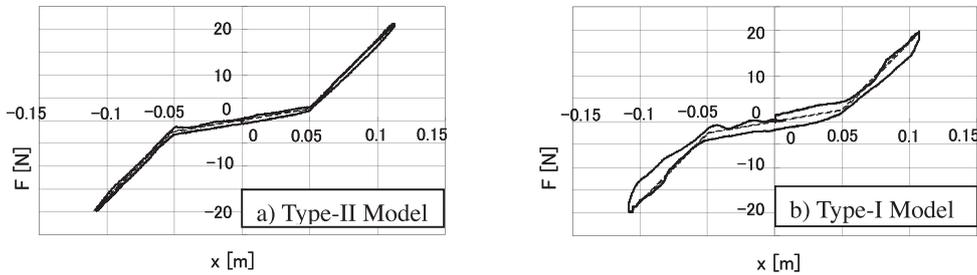


Fig.13 Dynamic Force Display of a Nonlinear Spring (Approximately 2 [sec/cycle])

また、クロス・オーバー周波数をほぼ 1 [Hz] に設定してあるので、Fig.9, 10, 11 より早い入力に対して力覚提示性能が如何に変わるかを調べた。その結果を前述の非線形バネについて、周期 4 秒 (0.25 [Hz]) の入力については Fig.12, 周期 2 秒 (0.5 [Hz]) については Fig.13 に示した。目標値は点線で示してあり、図から誤差を視認できる。いずれの場合も Type II のモデルを基本としたシステムでは極めて良い結果が得られた。周期 1 秒 (1 [Hz]) については、人の入力としてはかなり早くて適正な入力を発生することが困難だけでなく、当然のことながら力覚提示誤差もそれなりに劣化した。

6. 双方向マスター・スレーブへの応用

前節までに述べた力覚提示システムを双方向 (バイ・ラテラル) マスター・スレーブ システムの制御に簡単に応用できる。双方向マスター・スレーブにおいては、スレーブはマスター装置の力覚提示に使った理想的モデルに追従して動き、その結果環境から反力 f_s を受けるようにする。スレーブの運動方程式はマスターと同様に次式で与えられるとする。

$$\ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s = K_{As} u_s - \frac{1}{m_s} f_s \equiv v_s \quad \text{or}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_s \\ \ddot{x}_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -b_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} v_s \quad (16)$$

$$y_s = (1 \quad 0) x_s$$

マスターの運動方程式 (1) における人間の印加力 f_{ha} と異なり、スレーブ装置には環境反力が外力 f_s として加わる (符合が逆)。マスター操作器は力覚提示制御で述べた如く、Type II の内部モデル (理想的なコンピュータのモデル) に従うように設計されているとすれば、位置と力の関係をかなりの程度で任意に表現できるから、マスター操作器としてはその位置情報をスレーブ操作器に命令として与え、スレーブが受けた環境反力 f_s をマスター操作器で提示すべき力 f_d とすれば ($f_d = f_s$) 結果的に $f_{ha} = f_s$ を実現できる。

一方、スレーブ操作器はマスター操作器と同じ動きをすれば良いから、マスターと同じ内部モデルに追従するように設計すれば良い (マスター操作器は II 型の内部モデルの如く振舞う様に設計されている)。力覚提示の場合と全く同様に、式 (16) のスレーブの位置を式 (7) (8) のモデルの出力に追従させるため、追従誤差ダイナミクスが漸近安定となるパラメータ・ベクトル $k_s^T \equiv [k_{s1}, k_{s2}]$ を適当に選ぶと、スレーブの制御側は次のようになる。

$$v_s = -(k_{s1}, k_{s2} - b_s) x_s$$

$$+ \left(k_{s1}, k_{s2}, -\frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{T_{f1}}{T_b} \right) z_{ms}$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b} \right) \Delta f \quad (17)$$

この時、スレーブの閉ループ系は次式となって、

$$(\ddot{x}_s - \ddot{x}_m) + k_{s2}(\dot{x}_s - \dot{x}_m) + k_{s1}(x_s - x_m) = 0$$

$$\therefore x_s \Rightarrow x_m \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (18)$$

モデル・フォロイングが達成され、スレーブ操作器の伝達関数は次式に漸近する。

$$\frac{X_s(s)}{\Delta F} \Rightarrow \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{(T_{f1} + T_b)s + 1}{s^2(T_b s + 1)} \quad (19)$$

スレーブ操作器に対する実際のモータ入力 (17) より

$$u_s = \frac{1}{K_{As}} v_s + \frac{1}{K_{As} m_s} f_s$$

$$= -\frac{1}{K_{As}} [k_{s1} x_s + (k_{s2} - b_s) \dot{x}_s]$$

$$+ \frac{1}{K_{As}} [k_{s1} x_m + k_{s2} \dot{x}_m] - \frac{1}{K_{As}} \cdot \frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \frac{T_{f1}}{T_b} z$$

$$+ \frac{1}{K_{As}} \left[\frac{1}{\varepsilon m_m} \cdot \left(1 + \frac{T_{f1}}{T_b} \right) (f_h - f_s) + \frac{1}{m_s} f_s \right] \quad (20)$$

となる。スレーブの制御には環境反力 f_s の情報のみならず、マスターへ印加された力 f_h の情報も必要である。その為、マスター・スレーブ操作器の双方に力センサーが必要となる。結局、マスターはモデルを通じてスレーブを動かす、スレーブはモデルを通じて環境反力をマスターに伝えることになる。

7. 結論

追跡補償制御における人間の手動操作を表すクロス・オーバー・モデルを考えることによって人に優しい力覚提示装置の設計法を提案した。それはダイナミックな力覚提示性能を高精度で実現するために、原点に二重極を持つ II 型の内部モデル・システムをエクスプリシット・モデル・フォロイング (Explicit Model-Following) 制御によって実現する手法である。システム実現に必要な各種のパラメータやゲインはクロス・オーバー・モデルの要求を満たすように選ぶ。制御性能を調べるために次元の力覚提示装置を製作し、実験を行った。その結果、静的入力だけでなく動的入力に対しても定量的に高精度で力覚を提示できた。

比較のために、内部モデルを I 型とした場合の力覚提示システムも設計・実験し、動的入力に対する II 型内部モデル方式の優位性を確認した。動的精度のみについては、II 型以上の内部モデルも考えられるが安定性その他の問題がある。

この II 型内部モデルの力覚提示システムをバイラテラル・マスター・スレーブ・システムに応用する手法についても述べた。マスターは内部モデルを通じてスレーブを動かす、スレーブは同じ内部モデルを通じて環境反力をマスターに返すことになる。

参考文献

- 1) 吉川 恒夫(1991)：“ロボットにおける力制御の現状と将来”，日本ロボット学会誌，vol.9，No.6，pp.62-65.
- 2) 小菅 一弘(1991)：“力制御法の分類と制御システムの設計法”，日本ロボット学会誌，vol.9，No.6，pp.67-74.
- 3) 舘 暉(1991)：“マスタスレーブロボットにおける力制御システムの設計法”，日本ロボット学会誌，vol.9，No.6，pp.82-88
- 4) 横小路 泰義，吉川 恒夫(1990)：“マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作性”，計測自動制御学会論文集，Vol.26，No.5，pp.572-579.
- 5) 横小路 泰義，吉川 恒夫(1991)：“理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブ・マニピュレータのパイラテラル制御”，計測自動制御学会論文集，Vol.27，No.1，pp.56-63.
- 6) 小林 尚登 ほか 16 名(1997)：ロボット制御の実際，計測自動制御学会，pp.117-143.
- 7) 古田 勝久，小菅 一弘，塩手 良知，秦野 浩(1988)：“仮想内部モデルに基づくマスタスレーブ・マニピュレータの制御”，計測自動制御学会論文集，Vol.24，No.2，pp.176-182.
- 8) 榊 泰輔，舘 暉(1995)：“サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における接触安定性の改善方法”，日本ロボット学会誌，Vol.13，No.5，pp.659-665.
- 9) Kawahata, N. (1980)：“Model-Following System with Assignable Error Dynamics and Its Application to Aircraft”，*Journal of Guidance and Control*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol.3, No.6, Nov.-Dec., pp508-516.
- 10) McRuer, D. T., D. Graham and E. S. Krendel (1967)：“Manual Control of Single-Loop Systems : Part I & Part II”，*Journal of the Franklin Institute*, Vol.283, No.1 and No.2.
- 11) 古茂田 真幸(1993)：制御工学，朝倉書店，pp.164-188.

Real-time Visualization of Multiphase Flow by Means of Electrical Process Tomography

Je-Eun CHOI¹, Tong ZHAO^{1*} and Masahiro TAKEI²

Abstract

A new reconstruction method called Generalized Vector Sampled Pattern Matching (GVSPM) has been applied to an ill-posed inverse problem involving an electrical process tomography for multiphase flow. The characteristics of GVSPM method were examined using a simulation for pseudo particle concentration distribution images. Overall, the GVSPM method was proved superior to the LW and the ITR methods in the case of annular pseudo particle images. Then, a large scale electrical capacitance tomography (ECT) system was designed to visualize the powder concentration in the process of mixing air and FCC catalysts in a vertical pipeline. The concentration distribution image was obtained its accuracy was also discussed systemically. Moreover, another research focused on the fabrication of a micro-channel and the visualization of solid-liquid two phase flow in the micro-channel. A micro-channel with commercial connector system for 60 electrodes was fabricated. The impedance between the electrodes was measured with changed frequency, and the cross-sectional impedance was determined.

Key Words : GVSPM method, Electrical capacitance tomography, Electrical impedance tomography

1. Introduction

Recently, process tomography (PT) has become increasingly popular for multiphase flow measurement. The PT has previously been investigated as a visualization technique for solid behavior in solid-air two-phase flow¹⁾⁻³⁾. The PT sensor containing several electrodes is wrapped around the circumference of a pipeline, and the capacitances between the electrodes are measured. The particle concentration distribution, which is based on the permittivity distribution in a cross section, is obtained from the experimental capacitances. This is performed using an image reconstruction technique that is based on an ill-posed mathematical inverse problem. Because inverse problems are heavily dependent upon the system equation, a suitable image reconstruction technique is necessary. Recently, the iterative techniques such as the Landweber (LW) method and the Iterative Tikhonov regularization (ITR) method have been widely used because of the relatively high accuracy of their reconstruction images⁴⁾. These conventional reconstruction techniques, however, have several drawbacks with regard to empirical value setting and convergence at an infinitive number of iterations.

In order to overcome the drawbacks of these iterative methods, Saito et al. proposed a novel solution strategy called the Sampled Pattern Matching (SPM) method for ill-posed linear inverse problems⁵⁾. This inverse problem solver was then generalized for various types of linear system equations. The key idea of the generalized solver, so called Generalized Vector Sampled Pattern Matching (GVSPM) method lies in an objective function that estimates convergence from the angle obtained by the inner product between the input vector and the solution vector. However, the GVSPM method has not yet been used as a reconstruction technique for the electrical capacitance tomography. It is necessary to clarify the characteristics of this GVSPM Method by comparing with the conventional Landweber and Iterative Tikhonov regularization methods.

Then, as an application of the Electrical capacitance Tomography (ECT) technique using GVSPM method, an ECT sensor was designed for the visualization of the powder concentration in the fluid catalytic cracking (FCC) process, which is the most important technology to convert low-value heavy ends of crude oils into more valuable blended stocks, such as commercial gasoline. Approximately 45% of worldwide gasoline production is

¹ Mechanical Engineering, Graduate School of Science and Technology (Doctor's Course), Nihon University

² Department of Mechanical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University

* Corresponding author

Received 29 October 2009, Accepted 11 March 2010

generated through the FCC process and its ancillary unit⁶⁾. The catalytic cracking efficiency and flow condition of the FCC catalyst is a key factor in producing high-octane gasoline. Therefore, concentration visualization of the FCC catalyst distribution is indispensable. On the other hand, the ECT technique was believed with the potential to noninvasively visualize powder behavior in a cross-section of a pipeline, which has been investigated as a visualization technique for multiphase flow. Numerous studies have investigated the improvement of image reconstruction methods⁷⁾ and industry applications, such as bubble coalescence and formation in a fluidized bed⁸⁾, pneumatic conveyance¹⁾, and a coating process in a spouted bed⁹⁾. Tortora et al. compared the FCC catalyst powder concentration obtained by electrical tomography and Gamma Densitometry Tomography in the petroleum refinery process, and reported that they agreed well¹⁰⁾. However, the relationship between powder-air flow volume rate ratio and powder concentration distribution has not yet been discussed.

Moreover, another research was focused on the application of the electrical impedance tomography (EIT) in the micro-channel. Fuelled by developments in personal computing and sensor design, research into application of tomography to industrial processes began to gain popularity in the early 1990s. Techniques have been influenced by successes in medicine; however, in many cases, the demands of industrial applications are significantly different. It is not uncommon to require many cross-sectional images per second, at low cost, using equipment that is easy to operate and introduces no risk to the user. A particularly successful approach for industrial applications involves electrical tomography. Three, relatively low frequency, measurement modalities are used to determine distributions of conductivity (resistance), permittivity (capacitance) and permeability (inductance), and these are the subject of the present survey. In past our research have been carried out a measurement of the particle distribution in large scale channel and making the cross section image of channel by using the capacitance tomography methods^{11), 12)}. Recently, micro channel apply to various industry, so it need to various measurement and analysis method for understand about the inside reaction in micro channel. We proposed and developed a micro channel system using

electrical tomography based on the tomography method. In this research, before using electrical tomography, the concentration of particle in a micro channel with 60 electrodes is measured resistance with changed frequency, and the cross-sectional resistance is determined.

In the present paper, the GVSPM method was proposed as an accurate image reconstruction method of process tomography in order to overcome the drawbacks of the conventional iterative methods. The characteristics of the new GVSPM method were examined using a simulation for pseudo particle concentration distribution images. The results of this simulation were then compared to those from the conventional Landweber and Iterative Tikhonov regularization methods. Then, the GVSPM method was applied to reconstruct the FCC powder distribution image in the petroleum refinery process, with parameters of two air volume flow rates and four powder volume flow rates. Here, a 270-mm diameter ECT sensor is designed for the visualization of the FCC powder concentration. The accuracy of the reconstructed images was then evaluated by residual capacitance and correlation capacitance. Finally, the possibility for the application of GVSPM method in the micro-channel electrical tomography system was discussed in detail.

2. Evaluation of GVSPM Method

2.1 Governing Equations

The capacitance CT sensor is shown in Figures 1 (a). The twelve sensor electrodes are separated by insulation materials¹³⁾. The relationship between capacitance and permittivity in a static-electro field can be expressed as the following matrix expression:

$$\mathbf{C} = \mathbf{S}_e \mathbf{E} \quad 1)$$

where \mathbf{E} is the permittivity distribution of particles in the cross section, \mathbf{S}_e is the known sensitivity map matrix and \mathbf{C} is the measured capacitance matrix. In the case of 12 electrodes and $32 \times 32 = 1024$ pixels in the pipe cross section, as in Figure 1 (b), the sensitivity matrix \mathbf{S}_e in Equation 1 is a 66×1024 matrix, the capacitance matrix \mathbf{C} is a 66×1 column vector, and the permittivity distribution matrix \mathbf{E} is a 1024×1 column vector. The mathematical method used to obtain the permittivity matrix \mathbf{E} from both the capacitance matrix \mathbf{C} and the sensitivity matrix

S_e is an ill-posed inverse problem because the inverse matrix S_e^{-1} does not exist. In the calculation, all the pixels of \mathbf{E} that locate at the pipe wall and outside the pipe are set as 0.

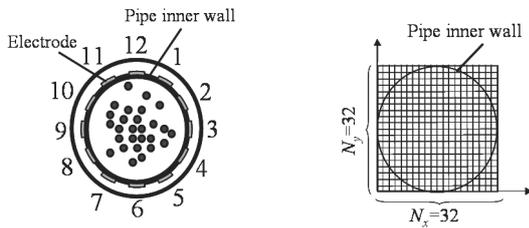
In order to solve this inverse problem, many methods have already been proposed such as the LW method and the ITR methods. Comparing with the conventional method, although the GVSPM method is also an iterative method, it has one characteristic that other iterative methods do not: the inclusion of an objective function in the general solution¹⁴. The objective function of k^{th} iterative particle distribution $E^{(k)}$, $f(E^{(k)})$, is given as follow:

$$f(\mathbf{E}^{(k)}) = \mathbf{C}^{(\text{exp})} \cdot \mathbf{C}'^{(k)} \rightarrow 1.0 \quad (2)$$

This objective function uses an inner product to determine whether the solution converges between the capacitance of k^{th} iterative particle concentration image, $\mathbf{C}'^{(k)}$, and the experimental capacitance, $\mathbf{C}^{(\text{exp})}$. Here, the prime symbol ' indicates normalization by the norm. The particle concentration distribution obtained by GVSPM method is $E^{(k)}$ when $f(E^{(k)})$ approaches 1.0. The relationship between the k^{th} iterative solution, $E^{(k)}$, and the $(k-1)^{\text{th}}$ iterative solution, $E^{(k-1)}$, is

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{(k)} &= \mathbf{E}^{(k-1)} - \mathbf{S}_e^{-1T} \Delta \mathbf{C}^{(k-1)} \\ &= \mathbf{E}^{(k-1)} - \mathbf{S}_e^{-1T} \left(\frac{\mathbf{S}_e \mathbf{E}^{(k-1)}}{\|\mathbf{S}_e \mathbf{E}^{(k-1)}\|} - \mathbf{C}^{(\text{exp})} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

In this equation, $\|\cdot\|$ indicates the norm.



(a) Cross sectional view (b) Space resolution

Figure 1 Overview of capacitance tomography

2.2 Evaluation of Image Accuracy

The GVSPM, LW and ITR methods are tested using pseudo particle distribution images of solid-air two-phase flow. Figure 2 shows pseudo images. Because the actual solid-air two-phase flow image consists of

main particle bulk and dispersion particles around it, ten different dispersion concentration rates (DCR) between 0% and 100% are considered. For example, a 10% DCR correlates to a random white noise value between 0.0 and 0.1, which highlights the dispersion particles. These values are assigned to each pixel in the original 0% DCR image. Values over 1.0 replace all of the pixels with the original pseudo particle images.

The representative reconstructed images that were obtained using each method are presented in Figures 3 and 4 as a reference. Figure 3 shows the images for iteration number $I=30$ and 0% DCR . Figure 4 shows the images for iteration number $I=30$ and 100% DCR . From these figures it is evident that the annular images reconstructed using the GVSPM method is clear then the images reconstructed by other methods.

In order to estimate each method quantitatively, the image correlation I_C are calculated using the following:

$$I_C = \frac{\sum_{i=1}^m \left[(e_i^{(k)} - \bar{\mathbf{E}}^{(k)}) (e_i^{original} - \bar{\mathbf{E}}^{original}) \right]}{\sum_{i=1}^m \sqrt{(e_i^{(k)} - \bar{\mathbf{E}}^{(k)})^2} \sum_{i=1}^m \sqrt{(e_i^{original} - \bar{\mathbf{E}}^{original})^2}} \quad (4)$$

In these equations, $e_i^{(k)}$ is i th element of the final reconstructed image $\mathbf{E}^{(k)}$, $\bar{\mathbf{E}}^{(k)}$ is the special mean pixel value of $\mathbf{E}^{(k)}$, $e_i^{original}$ is i th element of the original pseudo image $\mathbf{E}^{original}$. The high value of I_C means accurate reconstructed images. The details for each method are summarized in Figure 5 below. In general, the image correlation I_C decreases as DCR increases for GVSPM method. The GVSPM iteration process also proved to be very stable. Moreover, in Figure 5, where $I=30$, the I_C value for GVSPM is higher than those of LW and ITR regardless of DCR . Considering the three estimation categories as a whole, GVSPM is clearly superior to LW and ITR for all DCR values. This highly accurate reconstruction does not use an empirical value because the GVSPM method contains an objective function. Because the LW does not utilize an objective function and ITR has only a minimum least square criterion, matching between the experimental capacitance and the reconstructed image capacitance is not compensated during the iteration process¹⁵.

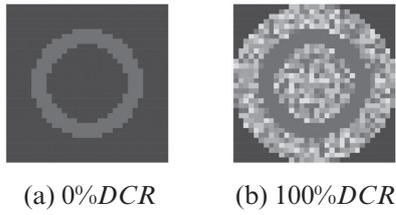


Figure 2 Pseudo images

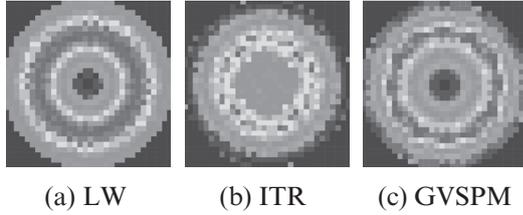


Figure 3 Reconstructed images with 0% *DCR*, $I=30$

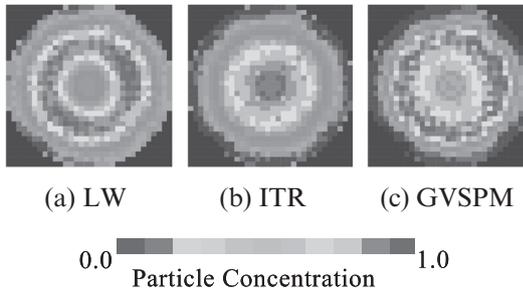


Figure 4 Reconstructed images with 100% *DCR*, $I=30$

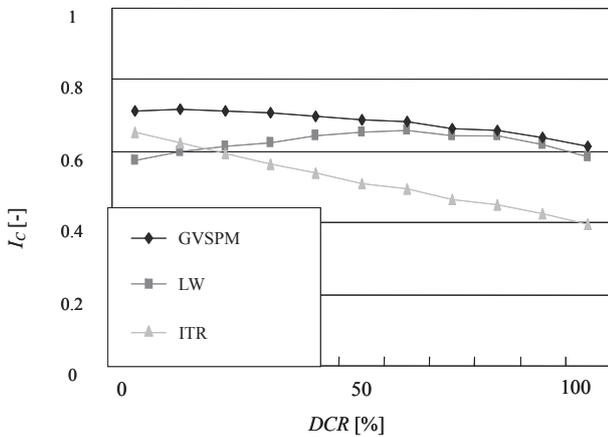


Figure 5 Image correlation of the reconstructed images with $I=30$

3. Application of Electrical Capacitance Tomography in Petroleum Refinery Process

3.1 ECT Sensor Design

Figure 6 reveals the configuration of the ECT sensor. As shown in Figure 6 (a), the sensor wrapped around an acrylic pipe is composed of twelve electrodes constructed of copper thin film, insulated polyamide

membrane cinctures, high-impedance resistances, and screen electrode¹⁶. As shown in Figure 6 (b), the electrodes separated by insulate polyimide membrane are composed of measurement electrodes, guard electrodes, and earthed electrodes.

Three methods are used to design accurate ECT sensors for noise reduction. First, several 1-M Ω resistances are connected between the measurement electrodes and the earthed electrodes in order to protect the sensor from the influence of stray capacitance. Second, screen electrodes are wrapped around the electrodes to absorb the outside noise. Third, two groups of guard electrodes are located at the top and bottom areas in order to maintain straight the concentration of electrical line, as shown in Figure 7. In order to prove the noise reduction effect of the screen electrode, capacitance values are measured every second by means of an LCR meter (E-4980A, Agilent Corporation) for both the cases in which the screen electrode is used and the screen electrode is not used. The time mean capacitance difference value of the ECT sensor without the screen electrode is 0.718 fF, which is higher than 0.235 fF, the value obtained with the screen electrode, indicating that noise has been absorbed.

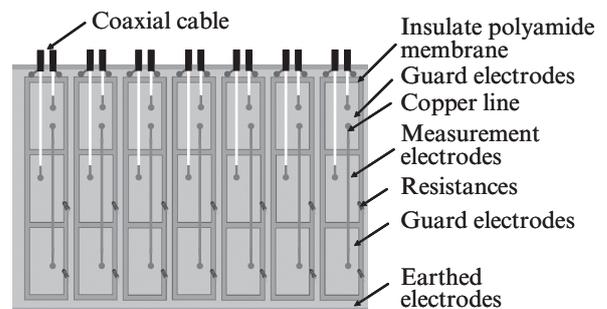
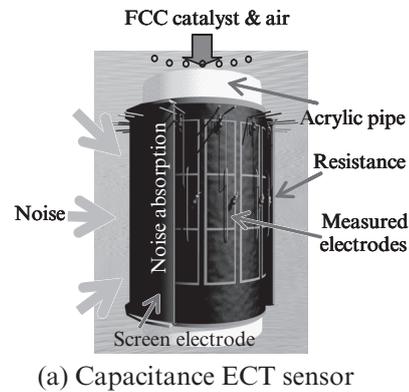
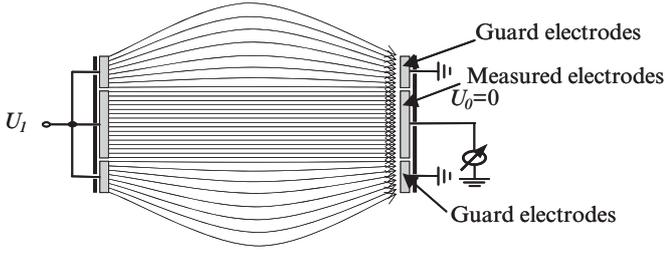


Figure 6 Configuration of the ECT sensor

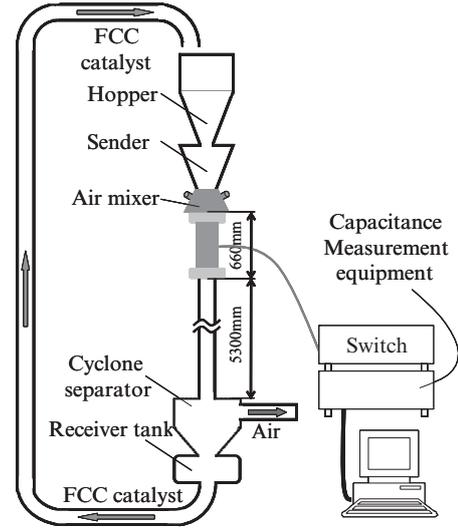

Figure 7 Guard electrode protections

3.2 Experimental Setup and Conditions

The experimental equipment consisted of a hopper tank, a sender, an air mixer, a vertical pipe, a cyclone separator, and a receiver tank, as shown in Figure 8. The vertical pipeline connected to the bottom of the air mixer had an inside diameter of $D = 270$ mm and a length of 5.3 m. An acrylic pipe having a length of 0.66 m was covered with an ECT sensor and was connected to the air mixer. FCC catalysts were supplied from the hopper tank to the air mixer inlet. The FCC catalyst powder used in this experiment was an MFI-type zeolite powder having a real density of $1,200 \text{ kg/m}^3$ and a relative permittivity of 2.7. The average powder diameter is $69.6 \text{ }\mu\text{m}$. The experimental conditions are shown in Table 1 for different FCC catalyst flow rates and air flow rates. The hopper was adjusted to provide four powder volume flow rates, Q_p , to the air mixer setting with two air volume flow rates Q_a , as shown in Table 1. In order to allow the powder to flow in a stable manner, measurement of the capacitances started at bases time using the PTL300E ECT system after a few seconds delay. The time interval to acquire the capacitances measured by 66 pairs of electrodes in a cross-section was $\Delta t = 10.0 \text{ ms}$. The total measurement time was $500 \Delta t$ ($= 5 \text{ s}$, $N_t = 500$).

3.3 Experiment Result and Discussion

The time mean distributions of the powder concentration images in the cross-section of the vertical


Figure 8 Experimental equipment

pipe were qualitatively reconstructed from the experimental capacitances, as shown in Figure 9. From Figure 9, it is clear that the powder concentration becomes partial with the increase of the solid air volume ratio. As the ratio increases, powders become increasingly concentrated near the wall. At the same time, the center-area powder concentration becomes smaller. Therefore, the powder and air flow rates influence the uniformity of the FCC catalysts concentration qualitatively.

The powder volume fraction calculated from the reconstructed image V_{FI} and the measured capacitance V_{FC} are compared in order to estimate the accuracy of the image. An image that gives a value of V_{FI} that is close to V_{FC} is accurate with respect to volume fraction, although the powder distribution cannot be determined. As a result, both V_{FI} and V_{FC} increase with the increase of solid air volume flow ratio. The differences between V_{FI} and V_{FC} were extremely low for all cases. Therefore, the accuracy of the powder volume fraction calculated from reconstructed images is very reasonable. Moreover, the residual capacitance C_R and the capacitance correlation C_C are calculated in order to prove the accuracy further.

Table 1 Experiment conditions

Air volume flow rate [m^3/s]	Powder volume flow rate [m^3/s]			
	$Q_{p1}=8.33 \times 10^{-3}$	$Q_{p2}=9.72 \times 10^{-3}$	$Q_{p3}=1.11 \times 10^{-2}$	$Q_{p4}=1.67 \times 10^{-2}$
$Q_{a1}=0.292$	Case 1.1 2.85×10^{-2}	Case 1.2 3.33×10^{-2}	Case 1.3 3.80×10^{-2}	-
	Case 2.1 1.76×10^{-2}	-	Case 2.2 2.35×10^{-2}	Case 2.3 3.54×10^{-2}

A high-accuracy reconstructed image has a small C_R value and a large C_C value. Figure 10 reveals the time mean residual capacitance values for each case. As shown in Figure 10, the time means residual capacitance value decreases with the increase in the solid air volume flow ratio. Figure 11 reveals the time mean capacitance correlation values for each case. As shown in Figure 11, the time mean capacitance correlation value remained approximately constant for each case. Consider these two estimation categories as a whole, the accuracy of the reconstructed image decreases with the increase of solid air volume flow ratio. Otherwise, in this research, experiments were carried out several times for same experiment condition, and the results present out very similar pattern every time. Therefore, the reproducibility of the experimental results is reliable.

4. Application of Electrical Tomography in Micro-channel

A micro channel is designed for electrical tomography comprising many electrodes which are distributed around the micro channel with rectangle cross-section, as shown in Figure 12. The rectangle cross-section has twelve sensor electrodes. In this microchannel, 60 sensor electrodes are attached around the micro channel to measure the particle distribution of five different positions.

The electrode has a diameter of $0.025\mu\text{m}$ and the electrode of interval in cross-section is $200\mu\text{m}$. The microchannel is made of quartz glass and has dimensions of $20 \times 0.6 \times 0.6$ mm, and cross-sections are separated by 5mm. Figure 13 shows a photograph of the microchannel with electrodes. The microchannel has three inlets on the left-hand side and three outlets on the right-hand side. Test flows can be made to flow through the inlets and outlets. The cover makes in order to do inject the test flows. There is a possibility of receiving the data to connect electric wire in the electrode tails.

The experimental equipment consists of the microchannel system, the micro pumps, a function generator, a switch, and a computer as shown in Figure 14. The micropump (IC3100 [KDS100], KD Scientific, USA) is an automatic dispenser and controls the flow rate to the inlets of microchannel. The function generator (E4980A, Agilent Technologies, Inc., USA) charges the frequency and the voltage to the switch. The switch (34980A, Agilent Technologies, Inc., USA) is used to flow the frequency and the voltage between the function generator and the microchannel system.

In this experiment, two types of fluid sample were used, namely, water and a conductive particle flow. The water was used tap water and the material of the conductive particle (5130A, Duke Scientific Corp., USA) is polystyrene. The diameter of the conductive particle

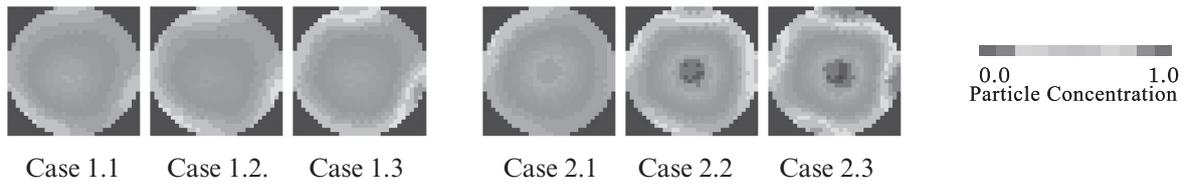


Figure 9 Time averaged images of powder concentration distribution

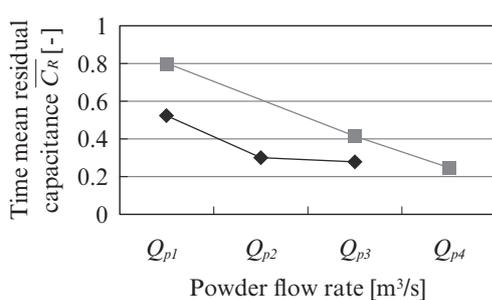


Figure 10 Capacitance residual

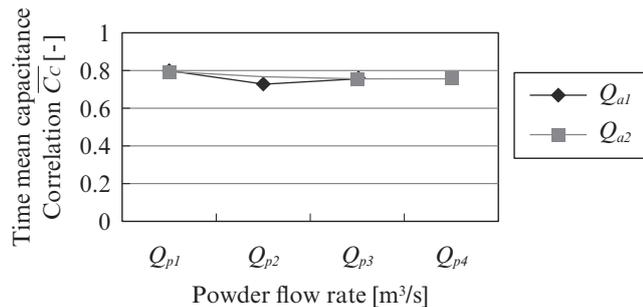


Figure 11 Capacitance correlation

was $1.3\mu\text{m}$, which is small enough that the particle is dispersed evenly within the carrier fluid. In the first experimental condition in order to examine the flow resistance of the water and the conductive particle flow. The water and the conductive particle flow 3% was injected into inlets A and C using a micropump(0.01 ml/s), respectively. The positions of the electrodes in the microchannel are shown in Figure 15. The electrode resistance was measured from position A to position S. The flow resistances were measured at the same distance of electrode pair and at different distance of electrode pair, as shown in Table 2. The measurements at the same distance were taken at $447.21\mu\text{m}$. The measurements at different distances were taken at $200\mu\text{m}$ (A-B), $316.23\mu\text{m}$ (E-F), $447.21\mu\text{m}$ (I-J), $509.9\mu\text{m}$ (O-N), and $583.09\mu\text{m}$ (T-R). In the second experimental condition considered in order to examine the flow resistance of the particle volumes of the conductive particle flow. The particle volume of the conductive particle flows are three types 1%, 3%, and 5%, respectively. The flow resistance in the conductive particle flow was measured at the same distance of electrode pair in the three cross sections, as shown in Table 3. The mixed conductive particle flow with water was measured, the water and the conductive particle flow were injected into inlets A and C simultaneously in Figure 16, respectively.

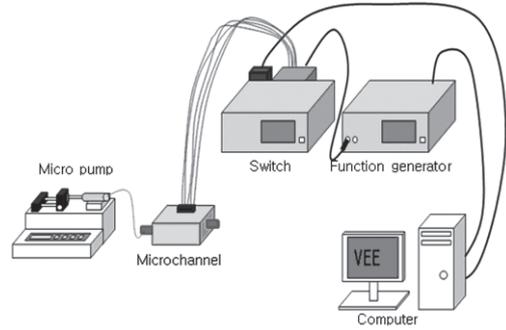


Figure 14 Experiment setup

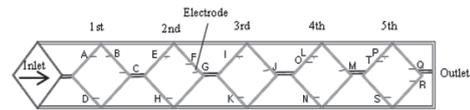


Figure 15 Position of electrode

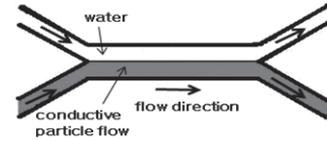


Figure 16 Procedure for fluid mixing

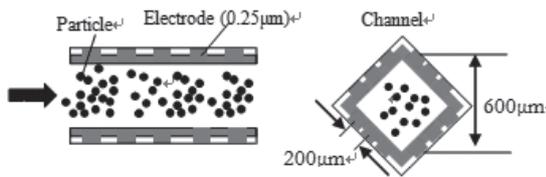


Figure 12 Configuration of micro channel

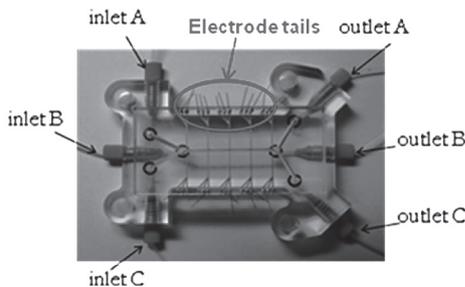


Figure 13 Photograph of the microchannel

Table 2 Measured position of resistance

Cross section	Same distance (length)	Increase distance (length)
1 st	A-C(447.21 μm)	A-B(200 μm)
2 nd	E-G(447.21 μm)	E-F(316.23 μm)
3 rd	I-J(447.21 μm)	I-J(447.21 μm)
4 th	L-M(447.21 μm)	O-N(509.9 μm)
5 th	P-Q(447.21 μm)	T-R(583.09 μm)

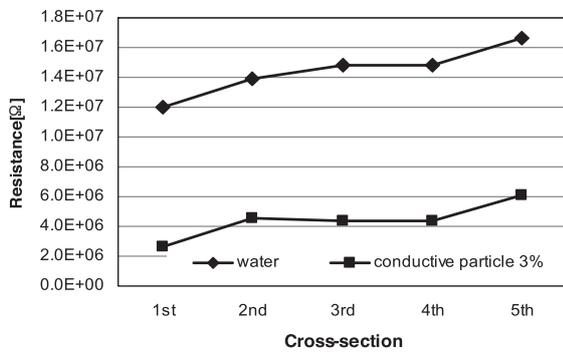
Table 3 Measured position of resistance for mixed fluid

Density of conductive particle	Cross section	Same distance (length)
1%	1 st	A-C(447.21 μm)
3%	2 nd	E-G(447.21 μm)
5%	3 rd	I-J(447.21 μm)

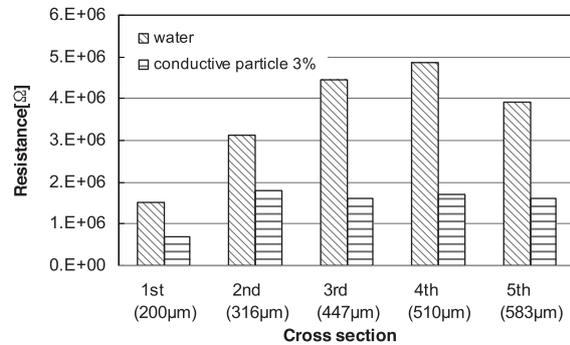
Figure 17 (a) shows the measured flow resistances for the case of the water flows and the conductive particle flow 3%. The measured values for the conductivity particle flows are smaller than those of the water flows. However, the resistance data was measured different data in each cross section of same distance because the resistance data for the water and conductivity particle flows are mean values. Even though the experiments

were carried out under the same conditions at the same distance, the resistance is measured different data. Therefore, it is produce data handle process. Figure 17 (b) shows the measured resistance for the different distance of resistance at each cross section. In addition, the measured resistances of the conductive particle flows are smaller than those of the water flows. The resistance of water increases as the distance increases. However, the resistances of the conductive particle flows remain approximately constant at each cross section. The abovementioned this resistance was measured different data in same condition and the resistance value is mean value. Therefore, the reason of constant is produce data handle process in conductive particle flow. Figure 18 (a) shows the flow resistance of three type of particle flow volume 1%, 3%, and 5% at same distance of electrode pair. From the figure, the flow resistances are decreased as the particle flow volume is increased. The resistance of the low-volume (1%) particle flow is a higher resistance than the flows at other particle flow volume. The high-volume (5%) particle flow is the lowest

resistance, however not much lower than the particle flow 3%. Figure 18 (b) shows the measured flow resistance for the mixed conductive particle flow with water of each particle volume. The mixed conductive particle flow with water is compared, the flow resistances are unsteady. Because the water diffuses to the conductive particle in the microchannel, the particles are not evenly distributed in the electrode distance. Therefore, the flow resistance of the mixed conductive particle flow with water is high resistance than the conductive particle flow as conductive particle flow and water mix in each particle volume. Figure 19 shows the measured resistance for the water flow, conductive particle flow 3%, and mixed water and conductive particle flow 3% to the time. The resistance of the water flow was generally higher than that of the conductive particle flow. The mixed water with conductive particle flow 3% is smaller than the water and larger than the conductive particle flow 3%. Moreover, the flow resistance keeps almost constant to the elapsed time in the three types flow. Thus, the microchannel is considered linear response and stable.

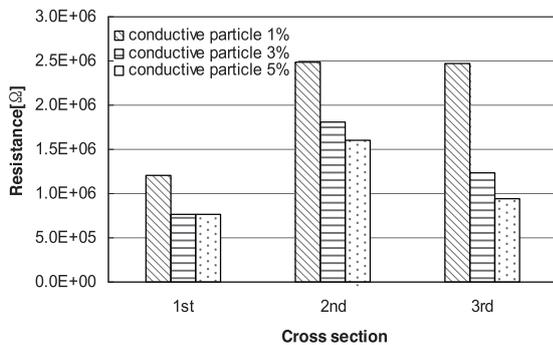


(a) Distance at 447.21 μm

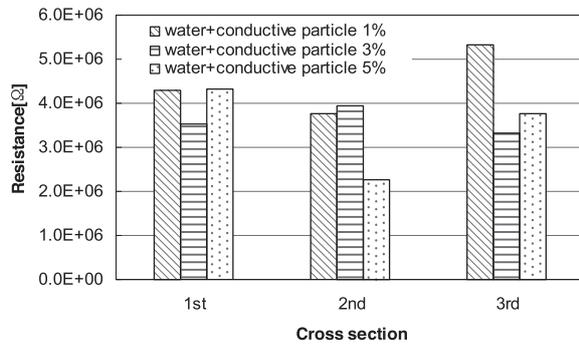


(b) increasing distance

Figure 17 Cross section of electrode resistance



(a) Without water



(b) With water

Figure 18 Cross section of electrode resistance in conductive particle flows

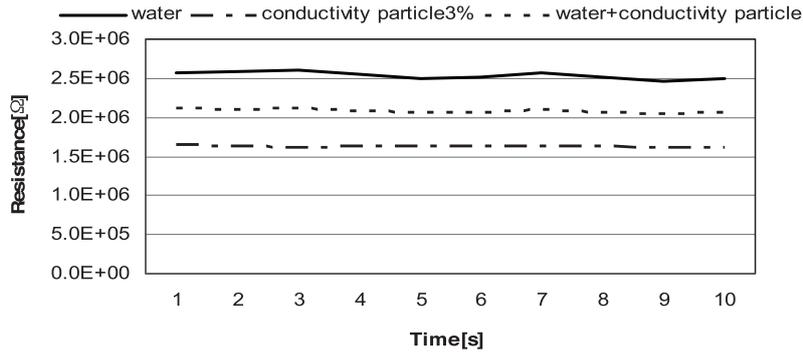


Figure 19 Flow resistance of three types flow in the cross section A

5. Conclusions

The Generalized Vector Pattern Matching Method (GVSPM) has been applied to an ill-posed inverse problem involving the electrical process tomography for solid air two-phase flow. The characteristics of GVSPM method were examined using a simulation for pseudo particle concentration distribution images and real experiment data. The details can be summarized as follow:

- 1) The result shows that the GVSPM is superior to LW and ITR methods for annular pseudo particle images in terms of image correlation, even though the GVSPM method does not use an empirical value. The GVSPM iteration process also proved to be very stable.
- 2) The GVSPM has been applied to reconstruct the FCC powder distribution images in the Petroleum Refinery Process. Experiments were carried out using FCC catalysts with two air volume flow rates and four powder volume flow rates. The time means capacitance residual values decrease with the increase of the volume ratio. However, the time mean capacitance correlation value remains approximately constant for each case. Therefore, considering the capacitance residual and capacitance correlation as a whole, the accuracy of reconstructed image is believable.
- 3) Moreover, the resistance in the micro-channel was measured for water flows and conductive particle flows, water flows were found to have higher resistances than the conductive particle flows. Furthermore, a low volume percentage of conductive particles were found to have high resistance compared to a high volume percentage of conductive particles. Mixed

flows of water and concentrated conductive particles produced unsteady results because water diffusion occurred inside the micro-channel. The experiment result shows the high possibility of the application of GVSPM method in this micro-channel system.

Acknowledgement

This work was supported by Grant-in-Aid for Scientific Research (B) (#21360088), Academic Frontier Promotion Program and Grant in-Aid for Specially Promoted Research, College of Science Technology, Nihon University.

References

- 1) Dyakowski, T., S.P. Luke, K.L. Ostrowski, and R.A. Williams (1999), On-line monitoring of dense phase flow using real-time dielectric imaging, *Powder Technology*, Vol. 104, pp. 287-295.
- 2) Halow, J.S. and P. Nicoletti (1992), Observations of fluidized bed coalescence using capacitance imaging, *Powder Technology*, Vol. 69, pp. 255-277.
- 3) Huang, S.M., A.B. Plaskowski, C.G. Xie and M.S. Beck (1989), Tomographic imaging of two-component flow using capacitance sensors, *Journal of Physics E Scientific Instruments*, Vol. 22, pp. 173-177.
- 4) Yang, W.Q. and L. Peng (2003), Image reconstruction algorithms for electrical capacitance tomography, *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, pp. R1-R13.
- 5) Saito, Y., E. Itagaki and S. Hayano (1990), A formulation of the inverse problems in magnetostatic fields and its application to a source position searching of the human eye fields *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, pp. 5830-5832.
- 6) Chen Y.M. (2006), Recent advances in FCC technology, *Powder Technology*, Vol. 163, PP. 2-8.
- 7) Takei M. (2006), GVSPM image reconstruction for ECT images of powders in a vertical pipe and comparison with the conventional method, *Measurement Science and Technology*, Vol. 17(8), pp. 2104-2112.
- 8) Wang S.J., T. Dyakowski, C.G. Xie, R.A. Williams and M.S. Beck (1995), Real time capacitance imaging of bubble formation at the distributor of a fluidized bed, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 56(3), pp. 95-100.

- 9) Takei M. and T. Zhao (2009), Measurement of particle concentration in powder coating process using capacitance computed tomography and wavelet analysis, *Powder Technology*, Vol. 193, pp. 93-100.
- 10) Tortora P.R., S.L. Ceccio, T.J. O'Hern, S.M. Trujilo and J.R. Torczynski (2006), Quantitative measurement of solids distribution in gas–solid riser flows using electrical impedance tomography and gamma densitometry tomography, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 32, pp. 972-995.
- 11) Takei M., M. Ochi and Y. Saito (2004), Image Extraction of Particle Concentration at the Plug Fron Using 3D Wavelets and comparison with LDV, *Powder Technology*, Vol.142, pp.70-78.
- 12) Takei M., D. H. Doh and M. Ochi (2008), Electrical CT image reconstruction technique for power flow in petroleum refinery process, *Experiments in Fluids*, Vol.44, pp.481-490.
- 13) Yang W.Q (1996), Hardware design of electrical capacitance tomography systems, *Measurement Science and Technology*, Vol. 7(3), pp. 225-232.
- 14) Endo H., S. Hayano, Y. Saito and K. Miya (2002), Generalized vector sampled pattern matching method -Theory and applications- Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VI)*, Netherlands, IOS Press, pp. 285-292.
- 15) Takei M., and Y. Saito (2004), Application of the Generalized Vector Sampled Pattern Matching Method to Reconstruction of Electrical Capacitance CT Images, *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, pp. 1371-1381.
- 16) Zhao T., M. Takei, K. Masaki, R. Ogiso, K. Nakao and A. Uchiura (2007), Sensor design and image accuracy for application of capacitance CT to the petroleum refinery process, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 18, pp. 268-276.

日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル投稿要項

平成 21 年 4 月 1 日制定
平成 21 年 4 月 1 日施行

I 趣 旨

この要項は、日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル刊行内規（以下内規という）第 14 条に基づき、日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル（以下研究ジャーナルという）の内容、投稿、執筆等についての必要事項を定める。

II 論文内容・投稿資格等について

1 研究ジャーナルの定義

内規第 7 条に定める研究ジャーナルの内容区分の定義は、次のとおりとする。

- ① 一般論文とは、通常の意味の一つの独立した原著論文である。
- ② ノートとは、断片的ではあっても、新しい価値ある事実を含む論文で、著者又は著者以外の既往の論文に対する補遺・意見等も含まれる。
- ③ 速報とは、独創的で重要な発見又は結論を含み、それを承認するに足るデータを備え、他に優先して掲載する必要のある論文である。この詳報は、後日、一般論文として投稿することができる。
- ④ 総合論文とは、著者が発表した複数の原著論文を関連づけ、一連の研究成果としてまとめて執筆したものである。

2 研究ジャーナル特集号の定義（以下特集号という）

特集号は、大学の命による調査団の報告書、その他理工学研究所が必要と認めたものであり、編集は当該調査団等の責任において行う。

3 投稿資格

研究ジャーナルの投稿資格は、次の各号のいずれかに該当する者とする。

- ① 日本大学理工学部・短期大学部（船橋校舎）（以下学部等という）に在職する者
- ② 日本大学大学院理工学研究所科博士後期課程、前期課程及び日本大学理工学部の在学生（ただし、指導教員の承諾を得なければならない）
- ③ 多年にわたり専任教員として理工学部に勤務し、現在非常勤講師である者
- ④ 編集委員会（以下委員会という）が特に認めた者

4 原稿ページ数

研究ジャーナルの内容区分の文字数及び頁数は、以下のとおりとする。

区 分	一般論文	ノート・速報
文字数	15,000 文字程度	5,000 文字程度
頁数	10 頁程度	4 頁程度

* 総合論文は、著者と委員会にて相談の上決定する。

5 投稿の受付

投稿を希望する者は、所定の理工学研究所研究ジャーナル投稿申請書、掲載論文著作権委譲確認書とともに原稿を研究事務課（以下所管課という）に提出する。

6 原稿の受付及び発行時期

論文誌の発行は年 3 回とし、原稿の受付及び発行時期は次のとおりとする。ただし、内規第 7 条及び本要項 II - 1, 2 に該当しない原稿は、執筆者に返却することがある。

原稿の受付	発行時期
2 月末	6 月末
6 月末	10 月末
10 月末	翌年の 2 月末

7 受付年月日

受付年月日は所管課で受付を行った日とし、受理年月日は査読結果に基づき委員会が掲載を決定した日とする。

8 原稿の提出部数等

- ① 原稿の提出部数は、一般論文、ノート及び総合論文の場合は、正原稿(図、表、写真を含む) 1 部並びに複写 2 部(図、表、写真を含む) とする。
- ② 速報は、正原稿(図、表、写真を含む) 1 部並びに複写(図、表、写真を含む) 1 部とする。
- ③ 前 2 項はいずれも正原稿の電子データを提出する。

9 論文掲載の採否

論文掲載の採否は、研究ジャーナル刊行内規第 11 条に基づき委員会が決定する。

10 投稿の取消し

査読過程の修正・内容照会等において、執筆者による修正原稿の提出が依頼の日から 2 か月以上経過した場合は、最初の原稿受付日を取り消し、再提出された日を新たに原稿受付日とする。ただし、1 か年以内に原稿の再提出がない場合は、委員会の議を経て投稿を取り消す。

11 原稿料

原稿料は支払わない。

12 抜き刷りの給付

執筆者には、研究論文集の抜き刷りを、30 部までは無償で給付する。ただし、30 部を超える部数を希望する場合は、執筆者が相当分の実費を負担する。

以 上

(内規抜粋)

- 第 11 条 論文の掲載の可否は、査読報告書に基づき審議の上、委員会が決定する。
- 2 2 名の査読者の査読判定が共に掲載可又は否の場合は、特に問題がなければ判定どおり決定する。
- 3 2 名の査読者間で査読判定が相違した場合、委員会は第 3 の査読者を選び、査読を依頼し、その結果に基づき委員会で審議をする。
- 4 査読判定において掲載否の理由が「照会に対する回答不十分」等の場合は、委員会において回答不足項目を検討・審議し、適切な措置をとる。
- 5 査読判定で研究ジャーナルの種類の変更を求められた場合は、委員会で検討の上、著者とその対応を協議・決定する。
- 6 特集号における論文掲載の可否は、当該調査団等が行うものとする。

以 上

日本大学理工学部理工学研究所研究ジャーナル執筆要項

平成 21 年 4 月 1 日制定
平成 22 年 4 月 1 日改正
平成 22 年 4 月 1 日施行

1 受付原稿

受付原稿は、執筆要項に従って執筆したもので、原則として Microsoft Word で作成した電子原稿（以下原稿とする）とする。

2 原稿の標準的作成方法は、次のとおりとする。

① 用紙サイズは、A4 判縦長とし、題名、著者名、概要及びキーワードは、横書き 1 段とし、Microsoft Word の 43 文字×38 行を基準とする。本文、参考文献及び付録は、横書き 2 段組とし、Microsoft Word の 20 文字×38 行 2 段組を基準とする。余白は、上 25 mm、下 25 mm、左 25 mm、右 25 mm とする。

② フォントは、邦文においては明朝、欧文は Times New Roman を基本とする。

③ 文字ポイントは、表題を 12pt. とし、それ以外は 10.5pt. とする。邦文はひらがな、カタカナ、漢字を全角とし、欧文英数字は半角を使用する。

④ 邦文論文の順序

- (1) 邦文題名
- (2) 邦文著者名
- (3) 欧文題名
- (4) 欧文著者名
- (5) 欧文概要
- (6) 欧文キーワード
- (7) 本文
- (8) 参考文献
- (9) 付録

⑤ 欧文論文の順序

- (1) 欧文題名
- (2) 欧文著者名
- (3) 欧文概要
- (4) 欧文キーワード
- (5) 本文
- (6) 参考文献
- (7) 付録

3 第 1 ページの体裁

- ① 邦文題名は、中央揃えで記載する。
- ② 邦文著者名は、題名から 1 行開けて中央揃えで記載する。名前の後には、著者の所属を参照するために、上付きで記号を付記し、脚注(後述)で所属を記載する。
- ③ 欧文題名は、邦文著者名から 1 行あけて中央揃えで記載する。
- ④ 欧文著者名は、欧文題名から 1 行あけて中央揃えで記載する。なお、著者が複数の場合、最後の著者名とその直前名の間は and で区切り、それ以外はコンマで区切る。
- ⑤ 概要は、欧文著者名から 1 行あけて、強調文字の英文で中央に Abstract と書き、200words 程度からなる概要本文を記載する。
- ⑥ キーワードは、概要から 1 行あけて、英文で Key Words: の文字列に続き、5words 以内で記載する。
- ⑦ 本文は、キーワードから 1 行あけて記載する。
- ⑧ 著者の所属は、脚注に次のとおり記載する。

邦文の場合

* 日本大学理工学部物質応用化学科；日本大学理工学部理工学研究所材料創造研究センター

欧文の場合、英文なら

* Department of Materials and Applied Chemistry, College of Science and Technology, Nihon University ; The Center for Creative Materials Research, Research Institute of Science and Technology, College of Science and Technology, Nihon University

4 本文の体裁

① 章・節・項は、次のとおりとする。本文は、それぞれから 1 行改行して記載する。

	表記	表示位置
章	1. 2. 3.	行の中央
節	1.1 1.2 1.3	行の左端から 1 文字目
項	1.1.1 1.1.2 1.1.3	

② 句読点

邦文は、全角カンマ(,)と全角ピリオド(.)を使用する。欧文は、半角カンマ(,)と半角ピリオド(.)を使用する。

③ 数字

- (1) 原則として算用数字(アラビア文字)(半角)を使用する。
- (2) 熟語、成句、固有名詞は漢数字を使用する。
- (3) 第一に、第二に、一つ目、二つ目などは、論文中で漢数字又は算用数字(半角)で統一する。

④ 図と表

- (1) 図及び表は、縮尺を考慮した完全な図面として文中に挿入する。
- (2) 図(グラフ、説明図、写真等)は、図 1、図 2 として、その次に図の表題を記載する。図の番号及び表題は、図の下に記載することを原則とする。
- (3) 表は、表 1、表 2 としてその次に表の表題を記載する。表の番号及び表題は、表の上に記載することを原則とする。
- (4) グラフの座標軸の説明は横書きで、縦軸は下から上へ、横軸は左から右へそれぞれ中央に記載する。

例：攪拌トルク□ T □ [N・m]

Distance from wall □ y □ [cm] ※□印はひとコマあける意味

- (5) 図表等を他の文献から転載する場合は、著者の責任において転載許可を得て、その出展を明記すること。
- ⑤ 用語はそれぞれ学会で決められたもの、又は日本工業規格(JIS)の標準用語を用いる。また付録Ⅱ用字例も参考とすること。
- ⑥ 単位は、国際単位すなわち SI(Systeme International d'Unites)による。単位記号については、それぞれの学会で制定したもの、又は JISZ8202(1974)、前述の SI、若しくは DIN1304 Allgemeine Formelzeichen(1968)を参照する。
- ⑦ 参考文献の表記
 - (1) 文献の本文の引用箇所に、右肩¹⁾・²⁾・⁵⁾・^{~8)}のように片カッコを付して番号を記載する。
 - (2) 表記は番号順に列記すること。

⑧ 記述上の注意

- (1) 文章は文章的口語体とし、特に欧文又はカタカナ書きを必要とする部分以外は、漢字・かな(ひらがな)まじり書きとする。
- (2) 漢字は常用漢字のみを使用するものとするが、常用漢字であっても表外音訓は使用しない。ただし、文脈上どうしても常用漢字以外の漢字を使用しなければならない場合は、ルビをふるものとする。
- (3) かなは、新かなづかいによる。ただし、外来語はカタカナ書きとする。

5 参考文献の体裁

- ① 文献の番号は、1 論文ごとに通し番号とし、片カッコを付して番号を記載する。
- ② 同一の著者が同年に複数の著書又は論文を発表している場合、文献は、発行の古い順から表記する。
- ③ 邦文文献の表記
 - ・(論文の場合)：著者名(発行年)：“論文名”，書物名又は雑誌名，巻数，号数，ページ数。
 - (例)
 - 1) 加鳥 裕明 (2002)：“圧電積層平板の有限要素解析”，日本機械学会論文集 A編，第68巻，第666号，pp.189-195。
 - ・(単行本の場合)：著者名(発行年)：書物名，発行所。
 - (例)
 - 2) 山内 鴻廣隆(2003)：環境の倫理学，丸善株式会社。
- ④ 欧文文献の表記
 - (1) 著者名は，単著の場合は，苗字，名前のイニシャル。

- (2) 著者名が複数名の場合は，1 番目の著者の苗字，名前のイニシャル，2 番目の著者のイニシャル，苗字 and 最後の著者のイニシャル，苗字(苗字の後には，ピリオドなし)。
 - ・(論文の場合)：著者名(発行年)：“論文名”，書物名又は雑誌名(イタリック)，巻数，号数，ページ数。
 - (例)
 - 1) Craig, J. (1999)：“Weight Estimates and Control”，in G. A. Khoury and J. D. Gillett (eds.), *Airship Technology*, Cambridge, Cambridge University Press, pp.235-271.
 - 2) Potvin, J., G. peek and B. Brocato (2003)：“New Model of Decelerating Bluff-Body Drag”，*Journal of Aircraft*, Vol.40, No.2, pp370-377.
 - ・(単行本の場合)：著者名(発行年)：書物名，発行地，発行所。
 - (例)
 - 3) McRuer, D., I. Ashkenas and D. Graham (1973)：*Aircraft Dynamics and Automatic Control*, Princeton, Princeton University Press.
 - ・(WWW の場合)：ブラウザー名(発行年)：書物名，www アドレス。
 - (例)
 - 4) Selig, M. S. (1998)：“UIUC Airfoil Coordinates Database”，UIUC Airfoil Date Site, URL : <http://www.ae.illinois.edu/m-selig>
- ⑤ 本研究ジャーナルの欧文表記の略称
J. Res. Inst. Sci. Tech., Nihon Univ.

以上

平成 年 月 日

第 号 理工学研究所研究ジャーナル投稿申請書

理工学研究所長 殿

申請者 所属 _____

氏名 _____ 印

1 表 題：和文 _____

英文.....

2 原稿の種類： 一般論文 ノート 速報 総合論文 (該当するものに○)

3 原稿の枚数： 本文 _____ 枚 図 _____ 枚 () 写真 _____ 枚 () 表 _____ 枚 ()
カラー印刷とする図表類のある場合は外数で () に枚数を記入して下さい。
超過ページ、カラー印刷のある場合は実費を請求する場合があります。

4 著者情報：※連名者欄が不足の場合は、適宜追加してご記入ください。

コレスポンディングオーサーには、「*」記号を付けて下さい。

「 」第1 著者名 _____ ローマ字 ()

所属 () 資格 ()

Organization () Title ()

E-mail () Tel. ()

「 」第2 著者名 _____ ローマ字 ()

所属 () 資格 ()

Organization () Title ()

E-mail () Tel. ()

「 」第3 著者名 _____ ローマ字 ()

所属 () 資格 ()

Organization () Title ()

E-mail () Tel. ()

5 希望査読者

※日本大学以外の査読者を5名程度推薦願います。査読者選定の参考にさせていただきます。

	氏名	所属	資格	連絡先
1				住所 〒 Tel. E-mail
2				住所 〒 Tel. E-mail
3				住所 〒 Tel. E-mail
4				住所 〒 Tel. E-mail
5				住所 〒 Tel. E-mail

6 抜刷り：30部までは抜刷りを無料で給付します。追加部数をご希望の場合（実費負担）：_____部

7 申請者の指導教員として、上記の執筆者の投稿を承認いたします。<※投稿者が学生の場合のみ>

所属：_____ 氏名_____印

研究事務課受付日：平成 年 月 日

Editorial committee of
Journal of Research Institute of Science and Technology, College of Science and Technology

Chairman	Takashi SAWAGUCHI	Department of Materials and Applied Chemistry
Editor-in-Chief	Kunio YASUDA	Department of Aerospace Engineering
Editorial Members	Masaaki NAKAMURA	General Education
〃	Yoshihiko MAENO	Department of Civil Engineering
〃	Misaki IZAWA	Department of Transportation Engineering and Socio-Technology
〃	Kiyooki ONO	Department of Mechanical Engineering
〃	Kazuo FUJIKAWA	Institute of Quantum Science
〃	kazuo USUGI	Department of Architecture
〃	Toshihiro IRIE	Department of Precision Machinery Engineering
〃	Shinichiro OHNUKI	Department of Electrical Engineering
〃	Joe OTSUKI	Department of Materials and Applied Chemistry
〃	Shinnosuke TADOKORO	Junior College · Department of Construction
〃	Shinji SATOH	Department of Oceanic Architecture and Engineering
〃	Sei TAKAHASHI	Department of Electronics and Computer Science
〃	Takeshi NIHEI	Department of Physics
〃	Ryoji KASAGAWA	Department of Mathematics
〃	Hideo SHIMAMURA	Research Affairs Section
Managing Editors	Reiko TSUCHIYA	Research Affairs Section
〃	Tomoya WAKAMAKI	Research Affairs Section

日本大学工学部理工学研究所研究ジャーナル 第 120 号 2010 年

平成 22 年 3 月 17 日 印刷
平成 22 年 3 月 24 日 発行

発行者 日本大学工学部理工学研究所
〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1 丁目 8 番地
TEL : 03-3259-0929 FAX : 03-3293-5829
E-mail: skenkyu@adm.cst.nihon-u.ac.jp
URL <http://www.kenjm.cst.nihon-u.ac.jp>
印刷所 丸善株式会社



JOURNAL

OF
RESEARCH INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
NIHON UNIVERSITY

Number 120

ORIGINAL PAPER

Force Display and Bi-Lateral Master-Slave Control with an Internal Model
under the Consideration of Human Cross-Over Model
.....Nagakatsu KAWAHATA, Masanori NISHIZAWA,
Youichirou ITOH and Hiroaki YOSHIDA 1

COMPREHENSIVE PAPER

Real-time Visualization of Multiphase Flow by Means of Electrical Process Tomography
.....Je-Eun CHOI, Tong ZHAO and Masahiro TAKEI 11

MARCH, 2010