

# 無反動制御によるロボットアーム手先カメラを用いた点検作業について

## Assessment of Reaction-Null Space Based Motion Control During Practical Camera Inspection Task

曾根 大樹 (都市大)  
正 佐藤 大祐 (都市大)

田本 健悟 (都市大)  
正 金宮 好和 (都市大)

Hiroki SONE, Tokyo City University

Kengo TAMOTO, Tokyo City University

Daisuke SATO, Tokyo City University

Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University, nenchev@tcu.ac.jp

This work describes an inspection task using a hand-held camera to be performed with a realistic free-flying space manipulator, without imposing reaction moments on the satellite base. To ensure a wide workspace under this condition, special care is taken about the algorithmic singularities encountered. These are shown to be successfully handled via the Singularity-Consistent method. The performance is verified through numerical simulation for a number of manipulator configurations and desired wrist motions. It is confirmed that the inspection task is suitable for a tele-operated space robot system, even in the presence of algorithmic singularities. In addition, it is shown that an inspection task under reactionless motion control has an advantage from the perspective of energy efficiency, when compared to reaction compensation via the reaction wheels.

**Key Words:** Free-flying space manipulator, Reactionless motion control, Singularity

### 1 緒言

今後の宇宙開発においては、人工衛星にマニピュレータが搭載された浮遊ベースロボットの積極的な利用が期待されている。想定されるミッションとして、軌道上サービス、宇宙デブリの回収や大型構造物の建造などが挙げられる。これらのミッションを遂行する上で、浮遊ベースロボットの特性を考慮したマニピュレータの適切な制御方法の開発が必要となる。浮遊ベースロボットの制御における課題は、マニピュレータの動作反動により生じる衛星本体の回転運動であり、マニピュレータの制御を困難なものとする。また、この回転運動自体が衛星本体と地上基地間の通信障害を引き起こすため問題とされる。そのため、浮遊ベースロボットがミッションを遂行するにあたり、衛星の姿勢維持は必要不可欠となる。

この問題に対する一つの対策として、衛星本体に搭載されたリアクションホイールの利用が一般的に想定されている [2]。しかし、リアクションホイールの出力トルクはマニピュレータの動作反動に対して微力であるため、この出力トルクに応じてマニピュレータの動作速度を低速度に制限する必要がある、作業効率の観点などから好ましくないといえる。このような背景から、衛星本体に対して反動を与えない無反動制御 [6] とよばれるマニピュレータの制御方法が開発され、技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) を用いた軌道上実験により、この制御方法が実現可能であることが実証された。しかし、無反動制御はマニピュレータの可動範囲を狭めるため、これを実用時に用いる方法は不明確であった。

このような背景のもと、我々は過去にマニピュレータの手先カメラを用いた目視点検作業への無反動制御の利用方法について検討した [3]。そして、無反動制御を用いることによりリアクションホイールを用いた場合と比較して、エネルギーの観点においても優れることを示してきた [4]。しか

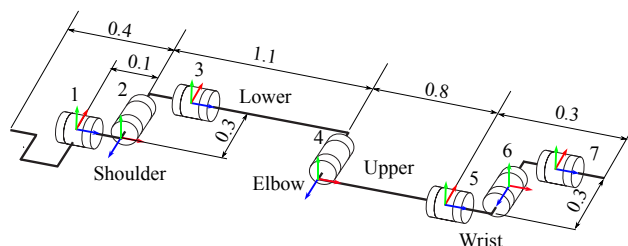


Fig. 1: Our manipulator model with seven-DoF mechanism at the initial configuration ( $\theta_i = 0 \text{ rad}, \forall \theta_i$ ).

し、無反動制御固有の複雑なアルゴリズム的特異点については考慮されておらず、実用を考える際にこの問題に対する対策は必要不可欠である。本研究ではこの特異点問題について言及し、特異点適合法とよばれる方法が解決策の一つとして有用であることを数値シミュレーションにより示す。

### 2 無反動制御を用いた手先カメラによる点検動作

#### 2.1 角運動量保存則

本研究では、図 1 に示す 7 自由度冗長マニピュレータを有する浮遊ベースロボットを対象として扱う。マニピュレータの質量、慣性モーメントは表 1 に示す通りとする。宇宙ロボットの運動を記述する角運動量保存則は、衛星の角速度、関節速度ベクトルを用いて以下のように表現される。

$$l_b = \tilde{M}_\omega \omega_b + \tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta} \quad (1)$$

式中  $l_b \in \mathbb{R}^3$  は衛星の質量中心回りのシステム全体の角運動量、 $\omega_b \in \mathbb{R}^3$ 、 $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^7$  はそれぞれ衛星の角速度ベクトル、関節速度ベクトルを表す。 $\tilde{M}_\omega \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $\tilde{M}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  は衛星の質量中心まわりのシステム全体の慣性テンソル、衛星とマニピュレータ間の動的干渉を表す干渉慣性行列を表す。式 (1) において、右辺第一項が衛星の回転運動により生じる角

Table 1: Dynamic model parameters.

	Mass [kg]	Inertia moment [kgm <sup>2</sup> ]		
$i$	$m_i$	$I_{xi}$	$I_{yi}$	$I_{zi}$
$b$	2552	6200	3540	7090
1	30.0	0.0671	0.0671	0.0851
2	30.0	0.0843	0.267	0.267
3	45.0	3.81	3.81	0.127
4	40.0	0.113	2.19	2.19
5	20.0	0.213	0.213	0.0250
6	20.0	0.0250	0.0292	0.0292
7	25.0	0.0990	0.0990	0.0313

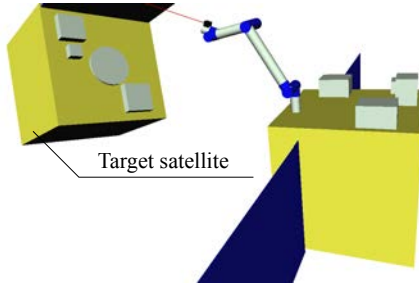


Fig. 2: Inspection task using the hand-held camera to observe a target satellite to be re-fueled or captured.

運動量，第二項がマニピュレータの動作により生じる角運動量を表し，これが衛星の回転運動を発生させる反動となる．以下，初期角運動量が零であるとし，また外力が作用せず角運動量は保存することを仮定する．

## 2.2 無反動制御

浮遊ベースロボットの無反動制御は衛星本体に対して回転運動を起因しないマニピュレータの動作を用いる制御方法を表す．先に述べたように，マニピュレータの動作反動は式 (1) における右辺第二項として表現され，この角運動量は干渉角運動量と定義される．無反動制御はこの干渉角運動量が零となる制御方法であり，その拘束条件は以下となる．

$$\tilde{M}_{\omega m} \dot{\theta} = 0 \quad (2)$$

上記を満たす関節速度の集合は次式により求まる．

$$\dot{\theta} = P_{RNS} \dot{\theta}_a \quad (3)$$

式中  $P_{RNS} = E - \tilde{M}_{\omega m}^+ \tilde{M}_{\omega m} \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は干渉慣性行列の零空間  $\ker(\tilde{M}_{\omega m})$  への直交射影行列を表す．また， $E \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は単位行列， $(\cdot)^+$  は擬逆行列を表す．

## 2.3 手先カメラを用いた点検作業への無反動制御の適用

1997 年より実施された ETS-VII の軌道上実験では，軌道上サービスの一環として手先カメラによる目視点検作業が行われた [5]．この作業は宇宙機の点検，スペースデブリ捕獲作業や構造物の建造など様々な場面で必要となるため，無反動制御により実現できる利点は大きいと考える．

無反動制御を用いてこの作業を行う場合，以下の三つのサブタスクを同時に実行する必要がある．

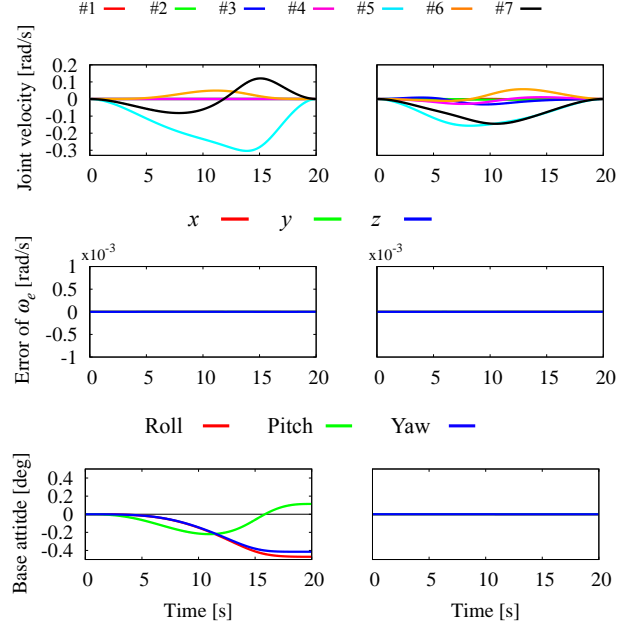


Fig. 3: Simulation result under the satellite observation mission; left column: wrist motion only and right column: reactionless motion.

1. 手先の姿勢制御（カメラの視点の切り替え）：3 自由度
2. 衛星の姿勢維持（無反動制御）：3 自由度
3. 手首位置の偏差の最小化

上記を満たす関節速度指令値は以下となる．

$$\dot{\theta}^{ref} = \bar{J}_{\omega_e}^+ \omega_e^{ref} + k_g P J_{v_w}^T \Delta p_w \quad (4)$$

式中  $\omega_e, \Delta p_w \in \mathbb{R}^3$  は手先の角速度ベクトル，手首の初期位置からの偏差を表す． $\bar{J}_{\omega_e} = [J_{\omega_e} P_{RNS}] \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  は Fixed-Attitude Restricted (FAR) ヤコビ行列 [6] と定義される行列であり，手先の姿勢に関する拘束を  $\ker(\tilde{M}_{\omega m})$  に射影する． $J_{\omega_e} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  は手先の角速度に関するヤコビ行列を表す． $P \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$  は  $\bar{J}_{\omega_e}$  の零空間への直交射影行列， $J_{v_w} \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$  は手首の速度に関するヤコビ行列， $k_g$  はゲインを表す．右辺第一項が無反動制御による手先の姿勢制御を表し，第二項により以下のポテンシャル関数を局所最小化し，手先カメラの位置の偏差を抑える．

$$V = \frac{1}{2} \|\Delta p_w\|^2 \quad (5)$$

## 2.4 数値シミュレーションによる検証

図 2 に示すような軌道上サービスにおける衛星の点検作業を想定し，式 (4) の検証およびエネルギー効率の評価を行った．シミュレーション時間を 20 s，マニピュレータの初期姿勢を  $[-90 \ -30 \ 0 \ -70 \ 180 \ -30 \ 0]^T$  deg，目標の手先角速度を  $\omega_e^{ref} = \pi[s(t) \ 0 \ 0]^T$  rad/s としてシミュレーションを行った．ただし， $s(t)$  は 0 から 1 への五次補間軌道を表す．局所最小化に関するゲインは  $k_g = 100$  とした．また，比較のため手首関節のみの運動（Wrist motion: WM）を用いて同様のシミュレーションを行った．

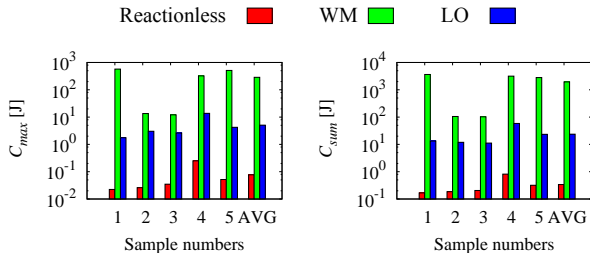


Fig. 4: Comparison of energy consumption under five conditions.

図3に示したシミュレーション結果より，無反動制御を用いて目標の動作を実現できたことが確認できる．また，手首関節のみを用いた場合，最大で  $-0.4 \text{ deg}$  程度の姿勢変化が衛星に生じているのに対し，無反動制御を用いることで姿勢変化を生じさせることなく同様の作業が実現可能となる．

次に，無反動制御のエネルギー消費量をリアクションホイールを用いた場合と比較検証する．想定するリアクションホイールの質量は  $10 \text{ kg}$ ，回転軸回りの慣性モーメントは  $0.11 \text{ kgm}^2$  とし，三軸ゼロモーメント制御方式を用いた．ランダムに選んだ五つの初期姿勢と手先の角速度指令値に対して，無反動制御，手首関節のみの運動 (WM)，マニピュレータの運動エネルギーの局所最小化 (Local Optimization: LO) の三つの制御方法を実行した．ただし，WM および LO はマニピュレータの動作により生じた衛星の姿勢変化をリアクションホイールにより補正するものとする．また，評価指標として以下の二つを用いた．

$$C_{max} = \frac{1}{2} \max_{t_0 \leq t \leq t_f} T(t) \quad (6)$$

$$C_{sum} = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} T(t) dt \quad (7)$$

式中  $T$  は駆動系 (マニピュレータとリアクションホイール) の運動エネルギーを表す．

図4に検証結果を示す．グラフにおいて横軸は実行したサンプル番号およびその平均値，縦軸は各評価指標を表す．無反動制御を用いることにより，WM に対して必要となるエネルギーが  $10^3 \sim 10^4$  分の1程度，LO に対しては  $10 \sim 100$  分の1程度減少する結果が得られた．これはリアクションホイールの消費エネルギーがマニピュレータに対して相対的に過大であり，リアクションホイールを使用しない無反動制御が局所的にエネルギー最小であることによる [4]．このように無反動制御の利用によりエネルギー消費量の削減が期待できる．

### 3 特異点問題

無反動制御を利用した点検作業は，リアクションホイールを用いた場合よりエネルギー消費量などの観点で有用であることを示したが，この方法は無反動制御に特有の複雑な特異点を持つ．本章ではこの特異点について詳しく言及する．

#### 3.1 アルゴリズム的特異点

式 (4) に存在する特異点は以下の二つに分類される．

- キネマティック特異点:  $\det(\mathbf{J}_{\omega_e} \mathbf{J}_{\omega_e}^T) = 0$

- アルゴリズム的特異点:  $\det(\bar{\mathbf{J}}_{\omega_e} \bar{\mathbf{J}}_{\omega_e}^T) = 0$  かつ  $\det(\mathbf{J}_{\omega_e} \mathbf{J}_{\omega_e}^T) \neq 0$

上記のうち，キネマティック特異点に関しては多数の研究が成されており，特異点低感度法 [7] や特異点適合法 [8] などの対策方法が提案されている．これに対して，アルゴリズム的特異点に関する研究は少数であり，特に無反動制御の利用に伴う特異点はより複雑なものとなるため，この問題に対する解決策は確立されていない．先行研究においては平面モデルを対象とした研究や，ベースに柔軟性を持つマニピュレータのアルゴリズム的特異点に対する対策が議論されてきたが，これらの方法は今回の場合には適用が困難である．本研究では，我々がキネマティック特異点に対して提案してきた特異点適合法とよばれる方法が，アルゴリズム的特異点に対しても有用な解を与えることを示す．

#### 3.2 特異点適合法 (SC method)

式 (4) において，アルゴリズム的特異点は手先の姿勢制御を行う右辺第一項  $\dot{\theta}_{\omega_e}$  の  $\bar{\mathbf{J}}_{\omega_e}^+$  に存在する．この関節速度は  $\bar{\mathbf{J}}_{\omega_e}^+$  を特異値分解により表現することで以下となる．

$$\dot{\theta}_{\omega_e}^{ref} = \left( \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\sigma_i} \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \right) \omega_e^{ref} \quad (8)$$

式中  $\sigma_i$  ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$ ) は特異値， $\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3$ ， $\mathbf{v}_i \in \mathbb{R}^7$  はそれぞれ左特異ベクトル，右特異ベクトルを表す．特異点においては最小特異値  $\sigma_3$  が零となり，関節速度解を得ることができない．そこで，特異点適合法では式 (8) を以下のように修正し，特異点においても解を得る [8]．

$$\dot{\theta}_{\omega_e}^{ref} = b \left( \sum_{i=1}^3 \mu_i \mathbf{v}_i \mathbf{u}_i^T \right) \omega_e^{ref} \quad (9)$$

$$\mu_i = \prod_{j=1, j \neq i}^3 \sigma_j \quad (10)$$

式中  $\omega_e \in \mathbb{R}^3$  は手先角速度の回転方向， $b$  は角速度のスケールに用いる定数を表す．ここで， $\det(\bar{\mathbf{J}}_{\omega_e} \bar{\mathbf{J}}_{\omega_e}^T) = (\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3)^2$  であることから，式 (9) は手先角速度の大きさを  $\sqrt{\det(\bar{\mathbf{J}}_{\omega_e} \bar{\mathbf{J}}_{\omega_e}^T)}$  に比例させることと等価である．

先に述べた特異点低感度法では，特異点に対して適当な近傍領域を設定し，この領域内で逆行列の修正を行うが，特異点適合法を用いる場合，このような領域を設定することなく制御することが可能となる．これは，特異点低感度法に従う逆行列の修正方法が，手先速度に誤差を起因するのに対し，特異点適合法は手先速度の大きさのみに誤差を起因し，速度の方向に関しては正確に追従可能な性質を持つことによる．この速度の大きさに関する誤差は，遠隔操作などのような正確に速度の大きさを追従する必要がない作業においては問題とならず，今回想定する点検作業はこの条件にあてはまる．特異点適合法を利用した遠隔操作システムについては，[9] を参照されたい．

#### 3.3 数値シミュレーションによる検証

初期状態を特異点に設定した数値シミュレーションにより，アルゴリズム的特異点に対する特異点適合法の性能



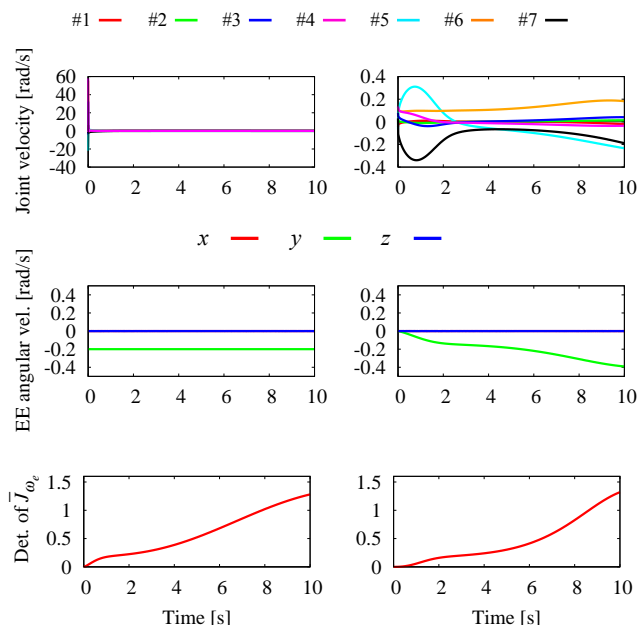


Fig. 5: Simulation result in the presence of the singularity; left column: without SC method and right column: with SC method.

を評価した．本研究で扱うアルゴリズム的特異点はその特異姿勢を解析的に求めることができないため，最急降下法により数値的にサンプルを算出した．このとき求めた特異点におけるマニピュレータの姿勢は  $[-88.9 \ -34.2 \ -47.7 \ -71.9 \ 166 \ 1.44 \ 0]^T$  deg であり，この姿勢を初期姿勢として設定した．このとき行列式は  $\det(\bar{J}_{\omega_e} \bar{J}_{\omega_e}^T) = -9.9 \times 10^{-17}$  となる．手先の角速度指令値は回転方向を  $\omega_e^{ref} = [0 \ -1 \ 0]^T$ ，大きさのスケールを  $b = 1.7$  rad/s として，シミュレーション時間を 10 s に設定した．また，比較のため特異点適合法を用いない場合のシミュレーションを同様の条件下で行った．ただし，手先の角速度指令値は  $\omega_e^{ref} = [0 \ -0.2 \ 0]^T$  rad/s とした．

図 5 にシミュレーション結果を示す．まず，特異点適合法を用いない場合，初期状態において特異点の影響による過大な関節速度の発生が確認できる．これに対し，特異点適合法を用いることで特異点においても過大な関節速度を発生させることなく，解を得ることが確認できる．また，指令した  $y$  軸方向のみに手先角速度が発生しており，指令した手先角速度の回転方向を正確に追従していることが確認できる．手先角速度の大きさに関する誤差は，先に述べたように遠隔操作を想定する場合オペレータによる修正が可能であるため，問題とならないことに注意されたい．

最後に，特異点上におけるマニピュレータの運動について説明を加える．特異点上においては  $v_3$  の方向にのみマニピュレータの運動が生じるが，今回検証したアルゴリズム的特異点においては， $v_3$  が瞬間的に  $\bar{J}_{\omega_e}$  の零空間ベクトルとなることにより，特異点から脱出することができたと考える．ただし，すべての状態において特異点から脱出可能であることは確かではなく， $v_3$  の運動により  $\det(\bar{J}_{\omega_e} \bar{J}_{\omega_e}^T)$  の値

が変化せず，特異点の集合上を運動し続ける場合は特異点から脱出不可能となる．この場合，手先角速度は常に零となり目標の作業を実行することはできないが，我々が複数の条件下で検証を行った範囲内ではこのような現象は確認されておらず，今回は詳しく言及しないものとした．この問題に関しては今後の課題としたい．

#### 4 結言

本研究では，マニピュレータの手先カメラを用いた点検作業における無反動制御の利用について検討した．特に，実用時において障害となるアルゴリズム的特異点の問題について言及し，特異点適合法とよばれる方法がこの問題に対して有効であることを数値シミュレーションにより示した．

特異点適合法を用いることにより，特異点を生じることなく指令した手先角速度の回転方向を正確に追従可能である．このとき生じる手先角速度の大きさに関する誤差は，遠隔操作などの作業においてはオペレータによる修正が可能であるため，この特異点問題は解決可能であると判断した．

無反動制御を用いることにより，リアクションホイールを使用した場合に比べ，作業効率およびエネルギー効率の改善が可能であり，今後の利用促進に期待したい．

#### 文 献

- [1] M. Oda, "Coordinated control of spacecraft attitude and its manipulator," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, pp. 732–738.
- [2] F. Aghili, "Coordination control of a free-flying manipulator and its base attitude to capture and detumble a noncooperative satellite," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2009, pp. 2365–2372.
- [3] H. Sone and D. N. Nenchev, "On some practical reactionless motion tasks with a free-floating space robot," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015, pp. 2836–2841.
- [4] 曾根, 佐藤, 金宮, "宇宙ロボットにおける無反動制御のエネルギー効率の解析", 日本ロボット学会学術講演会, 3C2-06, 2015.
- [5] M. Oda, K. Kibe, and F. Yamagata, "ETS-VII, space robot in-orbit experiment satellite," in *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, 1997, pp. 739–744.
- [6] D. Nenchev, Y. Umetani, and K. Yoshida, "Analysis of a redundant free-flying spacecraft/manipulator system," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 1992.
- [7] Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 108, no. 3, pp. 163–171, 1986.
- [8] D. N. Nenchev, "Singularity-consistent parameterization of robot motion and control," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 2, pp. 159–182, Feb. 2000.
- [9] Y. Tsumaki, D. Nenchev, S. Kotera, and M. Uchiyama, "Teleoperation based on the adjoint Jacobian approach," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 53–62, 1997.