コンピュータ支援遠隔操作の—シミュレーション実験 : 操作性向上の評価

山下 忠* 池田 広**
門司 竜彦*** 加藤 了三*

A Simulation Study of Computer Aided Teleoperation : Evaluation of Enhanced Manipulability

Tadashi YAMASHITA Hiroshi IKEDA
Tatsuhiko MONJI Ryoza KATOH

Fundamental data as for partitioning of functions between human operators and computers in teleoperation systems are offered in this paper. These data were experimentally obtained by using a simulator. The simulator is composed of three components: a hypothetical robot manipulator capable of moving in two dimensional plane; an aiding device; input devices necessary in a manual mode of teleoperation. The aiding device can operate the robot hand to substitute a human operator for a while. It makes clear that the aiding device is very useful, especially in the case that human operator is a beginner or that task is too difficult to do, for example, the degree of freedom of the manipulator's motion is high.

Key Word : Teleoperation, Robot Manipulator, Computer Aided Device

1. ま え が き

宇宙空間や原子炉内あるいは深海などの危険な環境下での作業においては、遠隔操作によりロボット等を動作させて作業を行うことが、安全面だけでなく経済性の面からも必要である。しかし、このような作業では人間オペレータへの負担は大きく、またかなりのトレーニングも必要となる¹⁾が、計算機によって適切な支援を行うことができれば、オペレータの負担軽減や作業能率の向上が期待できる²⁾。

遠隔操作システムにコンピュータによる支援装置を組み込んだ方式として、J. Vertut は人間オペレータとコンピュータの持つ知覚、意志決定、操作の3つの機能に注目した上で、マスタ、スレーブ、支援の3つのサブシステムを有機的に結合する構成方法を提案している³⁾⁴⁾。

また支援形態として、(1)人間オペレータに有効な情報を提供するもの^{5)~7)}、(2)人間オペレータの機能の一部を代行するもの⁸⁾、(3)人間オペレータの意図を組みとる機能や意志決定機能の一部を代行するもの⁹⁾¹⁰⁾、などが考案され、その有効性が報告されている。しかし、どのようにシステムを構成すべきか、何を支援すべきか、どのように支援すべきか、などについてはまだその方法論は個別的であり、これらの問いに一般的に答えるにはまだ基礎データが十分でないように思われる。支援効果という立場からその支援効果を定量的に評価した研究は、谷の研究⁸⁾以外にはほとんど見あたらないのが実状である。

本研究は、コンピュータの支援により作業時間やミスオペレーションなどがどのように改良されるかを、計算機シミュレータを用いた実験結果より定量的に評価し、人間オペレータと支援装置の機能分担に関する基礎データを提供することを目指している。作業としては、マニピュレータの基本的な動作の1つである対象物体への接

原稿受付 1989 年 5 月 23 日

* 九州工業大学 ** 日本電装株式会社

*** (株)日立製作所

近及び把持を取り上げている¹¹⁾¹²⁾。支援の効果は、マニュアル操作の場合の作業成績との比較で評価される。

本稿では、はじめに静止物体に対する接近・把持作業について、次に定速度の移動物体の場合について述べる。

2. 実験システムの概要

Fig. 1 にコンピュータ支援による遠隔操作システムの概要を示す。このシステムを計算機内にシミュレータとして作成した。シミュレータは、(1) 対象物体を含めたロボットシステム、(2) 遠隔操作のための支援装置、(3) マニュアル操作時の入出力装置、の3つの部分から構成されている。

(a) ロボットシステム

ロボットとして2次元平面運動(2自由度の並進運動と1自由度の回転運動)を行う仮想のマニピュレータを想定する。このシステムへの入力ハンドを X および Y 方向に動かす位置指令 x_R, y_R とハンドを回転させる角度指令 θ_R の3つである。ハンドの3つの運動の動特性はすべて同じとした。たとえば、ハンドの X 方向の変位を x とすると、その伝達関数 G を、

$$G(s) = \frac{X(s)}{X_R(s)} = \frac{1}{s(s+2)} \quad (1)$$

とした。パラメータは、予備実験の結果を参考にし、人間オペレータにとって操作が簡単すぎない値、すなわち練習により作業成績の向上が期待できるような値に設定した。

(b) 支援装置

支援装置はコンピュータディビジョン部とコントローラ部から構成されている。

コンピュータディビジョン部はハンドと複数の対象物体との各距離からオペレータが接近しようとしている目標物体を同定し、同定が終了すると「支援可能」というメッセージをCRT上に表示する。シミュレータでは、ある対象物体へのハンドからの距離が設定した値以内に接近した場合、同定が終了したと見なすようにしている。

Fig. 1 Concept of computer aided teleoperation system.

コントローラ部にはマニュアルモードと自動モードの2つの制御モードがある。マニュアルモードのとき、人間オペレータは入力装置によりマニピュレータの3つの運動、つまり X および Y 方向への運動とハンドの回転運動を制御できる。人間オペレータはマウスのスイッチによりコントローラの制御モードをマニュアルモードから自動モードへ変更することができる。制御モードが変更されると、自動モードが起動され、その時のハンドの状態(位置・速度・姿勢)が自動モードでの初期状態とされる。

コンピュータによる支援モードには次の3つがある。

支援モード1: ハンドの姿勢に対する支援

支援モード2: ハンドの位置に対する支援

支援モード3: ハンドの位置・姿勢に対する支援
支援モード1, 2は部分的支援, 3は全面的な支援を行う。

(c) 入出力装置

マニュアル制御モードでの入力装置として、復元力を有するポテンショメータをジョイスティックに追加した3自由度のものを用意した。入力装置により操作できる入力は、角度 θ_R と位置 x_R, y_R の3つである。ハンドおよび対象物体の状況を人間オペレータに知らせる装置としてCRTディスプレイを用いた。

(d) 評価

ハンドが目標物体に対してオーバーシュートすることは、ハンドが接触時に物体を移動させるような不必要な力を発生することに対応する。最悪の場合には物体の変形・破損なども考えられる。よって、ハンドが目標物体に対して行き過ぎないように接近することが重要である。ハンドが対象物体を指定した時間以上取り込めば、把持に成功した、という形で把持作業をシミュレートした。実験結果の成績を評価する量として次の2つを定義した。

(ア) すべての目標物体に対する接近・把持作業が完了するまでの所要時間

(イ) 把持作業中に、ハンドが目標物体を完全に取り込めずにオーバーシュートを起こしたエラー回数

3. 実験の概要

試作したシミュレータを用いて次の3種類の実験を行った。

実験Ⅰ, Ⅱ: 静止物体に対する接近・把持実験

実験Ⅲ: 移動物体に対する接近・把持実験

ここで、実験Ⅰは遠隔操作システムにムダ時間がない場合、実験Ⅱは4秒のムダ時間がある場合である。Table 1は各実験での詳しい実験条件を表している。たとえば、実験Ⅰは次のような実験であることを表している。

Table 1 Conditions of experiments.

Number of Experiment	Degrees of freedom of the motion of hand		Object		Aiding Mode				Time lag of system	
			3 objects standing still	1 object moving at a constant velocity	Manual	1	2	3	not existing	existing (4 sec)
	2	3								
I		○	○		○	○	○	○	○	
II	○		○		○		○			○
III	○			○	○		○		○	

- ・3自由度のハンドの運動が扱われる。
- ・対象物体は3個の静止物体である。
- ・マニュアルモードと支援モード1～3の合計4種類の実験を行なう。
- ・システムにムダ時間はない。

実験Ⅱ、Ⅲの場合、ハンドの運動の自由度が2とあるのは、ハンドの姿勢の運動が扱われないことを表している。

4. 静止物体に対する接近・把持作業(実験Ⅰ)

(a) 実験方法

人間オペレータに表示する CRT ディスプレイの様子を Fig. 2 に示す。ハンド・目標物体はディスプレイ上ではそれぞれ大小の長方形(96×36 dot, 80×20 dot)で表される。ここで、100 dot が約 4.5 cm に相当する。人間オペレータは、入力装置を操作することでハンドを移動させ、ハンドの中に目標物体が3秒間完全に収められれば把持完了とした。このことをオペレータに知らせるために当該目標物体が CRT 上から消されるとともに、制御モードは再びマニュアルモードに切り替る。CRT の右側には現在の入力状況と許容最大操作量との関係で表示し、オペレータへのフィードバック情報とするようになっている。人間オペレータには、以下の事項に基づいて操作するよう指示した。

- (1) 3個の目標物体への接近・把持をなるべく早く完了させること。
- (2) 把持作業中に、ハンドが目標物体に対し行き過ぎないように操作すること。

(b) コントローラ

制御モードがマニュアルモードから自動モードに切り替わったとき、その時のハンドの運動状態から目標位置

にオーバーシュートなしで、滑らかにハンドが接近することがこの作業に対する制御装置には要求される。ロボットハンドの動特性は規定しているので、モデル・マッチングによるコントローラの設計¹³⁾を試みた。3つの運動についてモデルの伝達関数を以下のように決定した。

$$G_M = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\omega_n = 1.25) \quad (2)$$

G_M はステップ入力に対して応答が臨界制動を生じるような特性を持つ閉ループ伝達関数である。ロボットハンドの状態方程式は、

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

であるので、 G_M とマッチングを行うと、制御則は、

$$u(t) = 1.56r(t) - (1.56, 0.5)x(t) \quad (4)$$

となる。実際に加える操作量には最大値に制限を設けているので、制御系は Fig. 3 のように表される。

(c) シミュレーション実験

前述の3つの支援モードに、人間オペレータがすべて

Fig. 2 Scene on CRT display.

Fig. 3 Control system.

の操作を行うマニュアルモードを加えた計4モードについて実験を行った。目標物体は3個で、配置の異なる3パターンを用意した。それらと4つのモードを組み合わせで1ブロックとし、被験者1人あたり4ブロックの実験を行った。被験者数はいずれの実験も4人とした。

(d) 実験結果

Fig. 4はマニュアルモードでの典型的な実験例を、ハンドの変位と操作入力について示している。(1)はオペレータが初心者で、(2)は熟練者の場合である。ここで、「初心者」とは本実験を初めて行なう者を意味し、「熟練者」とは過去に何度も本実験を行なったことのある、操作パターンが一定化してきた者のことである。

(a) Displacements of robot hand.

(b) Control forces.

(1) Operation result by a beginner.

変位図の中の長方形はその期間で把持が完了したことを表している。シミュレーションのサンプル周期は100 msecである。この図より、初心者、熟練者にかかわらず、目標物体への接近に関しては大きな差異はなく、熟練者の場合において作業時間が短縮するのは、大きな操作量を発生したあとに、微調整をうまく行なっているためであることがわかる。なお、初心者は実験の初期にはFig. 2右側の操作状況を参照することが多いが、熟練者はこの情報を利用しなくなる傾向があった。

Fig. 5(1)は熟練者のマニュアル操作時でのハンドのX, Y方向への運動と回転運動を示したものである。マニュアルモードの場合、人間オペレータは3自由度の運動を同時に制御することはなく、この例の場合、まずXおよびY方向の運動を制御し、その後ハンドの姿勢の制御を行っている。Fig. 5(2)は同じ条件での支援モード3の場合の実験結果例である。図中の縦棒はこのときに制御モードがマニュアルモードから支援モードに切り替わったことを示している。また、図中長方形の右端が支援モードの終了時を表わしている。同図(1)にくらべて、作業時間の短縮およびミスオペレーションの回数の減少が明らかである。

以上のことから、コンピュータによる支援は、作業終

(a) Displacements of robot hand.

(b) Control forces.

(2) Operation result by an expert.

Fig. 4 Typical example of experimental results.

(a) Displacements of robot hand.

(b) Angle of robot hand.

(1) Operation result in manual mode.

(a) Displacements of robot hand.

(b) Angle of robot hand.

(2) Operation result in aiding mode 3.

Fig. 5 Improvement of control performances by using the aiding device.

端期での微調整作業および3自由度以上の運動において有効であることが示唆される。そこで、次の事項に着目して4人の初心者者の平均値を求めた。

(A) 練習による成績の変化

(B) 各モードでの成績

Fig. 6 は (A) について、**Fig. 7** は (B) についての実験結果である。練習の回数を4回までとしたのは、学習効果が顕著なのは最初の4、5回までで、それ以降では

あまり大きな変化がない、という予備実験の結果によるものである。**Fig. 7(a)** の図中の数は、実験における前後2ブロックについての平均作業所要時間を表している。これらの図より、以下のことがわかる。

(ア) 初心者でも、支援装置を用いることにより所要時間、エラー回数を改善できた。

(イ) マニュアルモードの場合、練習により成績の大幅な改善がみられた。

(a) Task time.

(b) Number of misoperations.

Fig. 6 Changes of the performance values in the trainings.

Fig. 7 Changes of the performance values by using the aiding device.

(ウ) 平均所要時間は、支援の各モード間で大きな差はみられない。平均エラー回数は、支援モードでは激減した。なお、支援時にもエラーが生じるのは、操作量の最大値を制限しているために、制御モードの切り替え時のハンドの運動状態によってはオーバーシュートを起こすことがあるからである。

(エ) 支援モード1の場合よりも支援モード2の場合の方がエラーの回数が多いのは、この実験システムでは人間オペレータにとって角度の制御の方が位置の制御よりも難しかったことを示唆しているように思われる。

5. ムダ時間要素を含む場合の接近・把持作業 (実験 II)

遠隔操作においてムダ時間は本質的である。本実験では、加えた操作量の影響がハンドの状態変化として、オペレータに表示されるまでのムダ時間を4秒とした。この実験では、操作される運動はXおよびY方向の2自由度の運動だけとした。したがって、支援装置を用いる場合の支援モードは常に2である。

Fig. 8 Typical operation result in manual mode in a case that system has a time lag of 4 seconds.

この実験では、ハンドの現在の状態は現在よりも4秒前までの操作量により決定されている。しかし、ハンドの動特性は既知であるとしており、さらに加えた入力をコンピュータは知ることができるので、コンピュータは4秒後のハンドの状態を計算することができる。そこで、コンピュータディシジョン部はこの状態を逐次計算し、支援が可能か否かを判断し、可能となると、人間オペレータにその旨のメッセージを送る。

Fig. 8(a)は熟練者がマニュアルモードで操作した場合のハンドの動きを示している。同図(b)は操作量 x_R, y_R で、システムにムダ時間がある場合、操作量にパルス状の波形が観察される。これは、人間オペレータがある期間操作を行なった後、入力をゼロとしてハンドの運動の様子が表示されるのを待ち、その結果をみてまた少し動かすという操作を行なうからである。ハンドが対象物体に接近するにつれ、操作量のパルスの幅・高さが減少し、微調整の特性がうかがえる。

Fig. 9はモード2の支援を用いた場合の実験結果である。同図(b)に示すように、ハンドの運動状態によっては、マニュアルモードから支援モードへのモード切り

(a) Displacements of robot hand.

(b) Control forces.

Fig. 9 Typical operation result by using the aiding device in a case that system has a time lag of seconds.

替え時に操作量の変化は大きくなるが、Fig. 8 のように操作量をゼロとして待つ期間がなくなり、ハンドは滑らかに対象物体に接近して行くことがわかる。また、作業時間も約 60 秒から約 35 秒へと大幅に短縮している。

練習による作業成績の変化についてのデータ処理結果を Fig. 10 に示す。この図より次のことがわかる。

- (ア) 支援装置を用いることにより、作業時間・エラー回数ともに改善している。とくに、作業時間の改善は大きい。
 - (イ) マニュアルモードの場合、練習による成績の改善は作業時間に若干みられるが難しい。
 - (ウ) 支援装置を用いた場合、作業成績は練習の回数にほとんど関係なく、ほぼ一定である。
- (ウ) の結果は、(i) 支援装置にとってシステムのダイナミクスが完全に既知であるとしたことと、(ii) 初心者が初めて操作を行なう際、一般に大きな操作量を加えることはなく、それゆえに操作は最初から成功することが多い、という 2 つの理由によると解釈できる。

(a) Task time.

(b) Number of misoperations.

Fig. 10 Changes of the performance values in the trainings.

6. 定速度の移動物体に対する接近・把持作業 (実験 III)

(a) 実験方法

ディスプレイ上では、ハンド・目標物体はそれぞれ大小の正方形 (30×30 dot, 20×20 dot) で表される。目標物体は、画面の左から現れて、右方向へ一定の速度で動く。動き方のパターンは、水平方向、右斜め上方向、および右斜め下方向への 3 種類とし、速度を 0 から 30 (dot/sec) の範囲で変えた 9 種類のパターンを作った。この目標物体は、一度に 2 つは現れることなく、把持されるか画面右端に到達したときに CRT 上から消えて、新しい目標物体が画面左端に現れる。目標物体は 3 度画面上に現われ、最後の目標物体が把持されるか、または画面右端に到達すると、シミュレーションは終了する。この実験では実験 II と同様にハンドの X および Y 方向の運動を扱い、姿勢の運動は扱っていない。したがって、この実験における支援は支援 2 のことである。上記以外については、4 節 (a) の実験方法と同じである。

(b) コントローラ

SLIDING MODE¹⁴⁾ による制御装置の設計を試みた。

Fig. 11 Typical operation result of teleoperating the robot hand to chase a moving object at a constant velocity.

この方法によれば、規定した運動条件でハンドの状態を確実に目標の状態に移動させることが可能である。プラントの離散化後の式を次に示す。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}u(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (5.a)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (5.b)$$

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$$

ここで、スライド曲線を次のようにする。

$$s(k) = \tilde{x}_2(k) + \lambda \tilde{x}_1(k)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_d(k)$$

$\mathbf{x}_d(k)$ は目標物体の状態である。操作量は次のように求められる。

$$u(k) = \frac{1}{b_2 + \lambda b_1} \{ T\lambda a_2(k) - (a_3 + \lambda a_1 - \lambda)x_1(k) - (a_4 + \lambda a_2 - 1)x_2(k) - (\Psi - \hat{\Phi}(k))\text{sat}(s(k)) \} \quad (6)$$

ただし、

$$\Phi(k+1) = \Phi(k)(1 - T\lambda) + T\Psi$$

$$\hat{\Phi}(k) = \Phi(k+1) - \Phi(k)$$

$$\text{sat}(s(k)) = \begin{cases} s(k)/\Phi(k) & \text{if } |s(k)/\Phi(k)| \leq 1 \\ \text{sgn}(s(k)) & \text{if } |s(k)/\Phi(k)| > 1 \end{cases}$$

T : シミュレーション時のサンプリング周期(100 ms とした)

Ψ : 任意の定数。一度 $|s(k)/\Phi(k)| \leq 1$ を満たすまでは、 $\Phi(k) = \Phi(0)$ とする。

実験では、各パラメータを次のように定めている。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.0906 \\ 0.0 & 0.819 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.00468 \\ 0.0906 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [1.0 \quad 0.0]$$

$$\lambda = 1.0, \quad \Phi(0) = 30, \quad \Psi = 20, \quad T = 0.1$$

(b) 実験結果

Fig. 11 は目標物体とロボットハンドのX方向の運動を時間軸で表現したものの一例である。(a)はマニュアル操作の場合、(b)は支援がある場合である。図中の2つの■印は、これらにはさまれた期間においてハンドが対象物体を把持したことを示している。マニュアルモードの場合、目標物体にかなり接近した後、ハンドが目標物体の付近で揺動するのに対して、支援がある場合はこのようなことがなく、ハンドは対象物体の運動にきわめて良好に追従している。このように、対象が移動物体の場合の作業は、静止物体である場合の作業よりも人間オペレータにとって困難な作業であるが、コンピュータによる支援により作業成績が向上することがわかった。

7. ま と め

マニピュレータの基本的な動作の1つである対象物体への接近および把持問題を例にとり、支援効果を実験的に検討した。実験は試作した計算機シミュレータを用いて、はじめに静止物体に対する接近・把持作業について、次に定速度の移動物体の場合について行った。支援の効果は、マニュアル操作の場合の作業成績との比較で評価した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) オペレータが初心者の場合、大きな操作量を発生せず、その結果作業時間が長くなる。

(2) 複数の操作量を同時に操作することは、人間オペレータにとって困難な作業であり、熟練を要する。

(3) 部分的な自由度の支援でも成績の向上が期待できる。

(4) 支援装置による作業の代行により、人間オペレータの負担を軽減できた。また、マニュアルモードの場合と比較して、成績が向上した。

(5) システムにムダ時間がある場合および移動物体の把持の場合、支援の効果はより顕著である。

以上得られた結果は人間オペレータとコンピュータの機能分担に関する基礎データとして有効であると思われる。なお、これらの結果は、支援システムが状態変化を完全に検知できるとして構成したシミュレータによるものであるという点、応用に当っては注意が必要であろう。

参 考 文 献

- 1) E. G. Johnsen and W. R. Corliss, "Teleoperators and Human Augmentation", An AEC-NASA Technology Survey, NASA SP-5047, pp. 65, 1967.
- 2) 高瀬, 若松: "知能的テレオペレーションシステムの構成法とその要素技術", 日本ロボット学会誌, 2巻, 6号, pp. 62-71, 1984.
- 3) J. Vertut et al, "Sensor-aided and/or Computer-aided Bilateral Teleoperator System (SCATS)", Proc. of RoManSy '84, The Fifth CISM-IFTOMM Symposium, pp. 281-292, 1984.
- 4) J. Vertut et al, "Key Note on Teleoperation, Computer Aided Teleoperation Systems, A Major Step to Intelligent Manipulation and Locomotion", Proc. of 1985 ICAR Symposium, pp. 545-568, 1985.
- 5) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda, "Tele-Existence Simulator with Artificial Reality (1)-Design and Evaluation of a Binocular Visual Display using Solid Models-", Proc. of 1988 IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 719-724, 1988.
- 6) B. Hannaford and R. Anderson, "Experimental and Simulation Studies of Hard Contact in Force Reflecting Teleoperation", Proc. of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 548-589, 1988.
- 7) Ph. Even and L. Marce, "Pyramide: An Interactive Tool for Modelling of Teleoperation Environments", Proc. of 1988 IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 719-724, 1988.
- 8) 谷和男, "遠隔マニピュレーションにおける対象物移動補償", 計測自動制御学会論文集, 第18巻3号, pp. 293-299, 1982.
- 9) 平井成興, 佐藤和正, "言語介在型マスタスレーブマニピュレータシステム", 計測自動制御学会論文集, 第20巻, 1号, pp. 78-84, 1984.
- 10) P. T. Boissiere and R. W. Harrigan, "Telerobotic Operation of Conventional Robot Manipulators", Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 756-582, 1988.
- 11) 山下忠他, "コンピュータ支援遠隔操作のシミュレーション実験", 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 197-200, 1988.
- 12) T. Furuya, T. Yamashita, T. Kurisaki, H. Ikeda, T. Monji and R. Katoh, "Supervised Robot System and Computer Aided Teleoperation, Proc. of 1988 IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp. 725-730, 1988.
- 13) たとえば, 金井喜美雄, 制御システム設計, 槇書店, 1982.
- 14) J. -J. E. Slotine and J. A. Coetsee, "Adaptive sliding controller synthesis for non-linear systems", Int. J. Control, 43-6, pp. 1631-1651, 1986.