

人間-機械-環境系の解析と環境適応型走行車の 制御系開発に関する研究

Analysis of man-machine-environment system and synthesis of
adaptively controlled vehicle system

代表研究者 東京農工大学工学部助教授 永井正夫
Assoc. Prof., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Agri. and Technol.
Masao NAGAI

協同研究者 東京農工大学工学部教務職技官 塩練俊一
Res. Assoc., Fac. of Eng., Tokyo Univ. of Agric. and Technol.
Toshikazu SHIONERI

In this study, adaptive control behavior of human driver is at first investigated when the man-machine system is influenced by the change of environment. According to the result of driving simulator study, a driver can change his handling performance adaptively to maintain the closed loop characteristics by his steering effort. If this advanced control performance of a human driver is realized in the steering system, the vehicle has an advanced performance of handling and stability.

Therefore a new control method is introduced to the vehicle design of advanced four wheel steering (4WS) vehicle. The method is based on the theory of model following control which is one of the adaptive control theory. The controller of steering system has a reference vehicle model. Two kinds of controllers are discussed theoretically; one of which consisting of the feedforward compensation, the other of which consisting of not only the feedforward compensation but also the feedback compensation.

According to the theoretical analyses and experiment of the closed-loop characteristics of driver-vehicle system, the following findings are obtained; (1) Because of the improvement of the dynamic characteristics, e.g. the resonant frequency of vehicle motion, the transient steering response is much improved. (2) Although the course tracking performance depends on the driver steering effort, the effort in the 4WS systems is not so greatly required as in the 2WS systems because of the suppression of unnecessary large yaw motion. (3) The 4WS vehicle including the feedback compensation shows much higher stability than that controlled by the feedforward compensation only, because the front and rear wheels are automatically steered by the feedback compensation for the vehicle body fluctuation corresponding to disturbance, such as side wind gust. (4) The possibility to realize this new control concept is verified by the experiment of the small sized vehicle running on the running belt facility.

研究目的

交通事故による死者がここ数年増加傾向を示し年間1万人に近づいており、一たん事故が発生すると多くの犠牲者が出る航空機の墜落接触事故や原子力発電などの大規模プラントの危険性が絶えない。一方でハイテク技術の進展に伴って、エネルギー効率や運動性能を飛躍的に向上させようと

するCCV(Control Configured Vehicle)化の機運が急速に高まりつつあり、安全性や信頼性を考慮した機械の性能評価がますます重要になってきた。

著者らはこのような時代的背景に着目し、人間-機械系の安全性に大きな影響を与える環境の変化を重視する観点にたち、人間-機械-環境系の

システム工学的研究を行ってきた。特にクリティカルな状況下における操縦者の特性をドライビング・シミュレータ実験により分析した結果、人間は一種の適応的挙動をする事実を明らかにしてきた。それによれば、ある限界以下の環境変化やそれに伴う機械の特性変化では、人間の適応性ゆえに十分対応できるが、一定の限界を越えると判断ミスや操作ミスが誘発され事故に至る危険性が高まることが判明した。

そこで本研究では、まず変化に対して柔軟に対処する人間の適応性を解析し定量的なモデル化を試みる。そしてそれを適応制御の手法を利用して機械系（自動車の操舵系）に取り入れることにより、操作中の環境の変化に対して機械が柔軟に適応して、人間の操作ミスを誘発させないための機械の特性の実現を計る。その場合人間と機械との協調的な特性が最大限生かされる制御系の設計と解析を行なう。このようにして人間的な機能の機械への付与により、環境の変化に強くかつ操縦者にとって心理的・生理的負担の少ない安全な人間-機械系をめざすことが本研究の目的とするところである。

研究経過

(1) 人間の適応操縦特性の数学モデルの検討

まず運転中に環境の急変や機械の特性変化が生じた時の人間の適応的な操縦特性を検討し整理した。さらに数学モデルを構築するために、文献調査や理論的検討を行なった。

(2) 適応機能を持つ車両の制御系の理論的検討

次に人間の適応的な特性をいかに機械系の中に実現するかという具体的な設計手順を得るために、「モデル規範型適応制御理論」という制御工学的手法を用いて、車両の制御系の設計法を理論的に検討した。車両については従来の操舵方式にとらわれず、前後の四輪を協調的に操舵する車両（これを四輪操舵方式の車両と呼ぶ）とした。

(3) 適応機能を持つ走行車の試作

生物が多く感じる感覚を持つように、各種のセンサー（外界感知センサーや自己の状態感知センサー）を取り付け、その情報を処理するマイク

ロ・コンピュータを車両に搭載する。そして模型実験車を製作し走行実験装置の上に走らせた。この実験装置により、走行条件や環境条件を変えても安定性などの性能が維持されるかどうか、また走行路上の障害物を安全に回避しうるかどうかを調べた。

(4) 計算機シミュレーションによる性能の検討

実際の運転状況における人間-機械-環境系の性能の検討のために、計算機を用いて大規模なシミュレーションを行なった。

研究成果

1. 適応制御特性の数学モデル

人間によって操縦される機械の運動性能を議論するとき、人間が機械の挙動をフィードバックしながら制御をしていると解釈することができる。これを制御工学ではフィードバック制御と呼んでいる。そして人間と機械とが一体となったシステムのダイナミクスを議論するとき、これを人間-機械系の閉ループ特性と呼んでいる。著者らのこれまでの研究によると、環境の変化によって車両の操舵応答特性が悪化した場合でも、人間ドライバの適応的な操舵努力により、閉ループ系の性能が悪くならないことが分かった。それは機械の特性が悪化したことを人間が知覚して、自らの特性をそれに合わせて変化させることができるからである。この人間の持つ優れた適応的な制御特性を、適応制御理論により説明することができた。すなわち人間は機械の操縦の経験を積んでくると、ある種の理想的なモデルを意識的あるいは無意識的に持つようになる。そこでもし運転中に機械の特性が悪化した場合には理想とするモデルとの差を検出してその差が無くなるように、自らの制御特性を変えることになる。このような人間の特性を適応制御理論の一種であるモデル規範型適応制御システムと定義して数学モデルを作った。そして道路環境の変化にともなう車両の安定性・安全性を解析した結果、人間の適応的な操縦特性を良く説明することができた^{1)~4)}。

2. 四輪操舵車のモデル追従制御方式

そこで、もし上に述べたような人間の適応的な

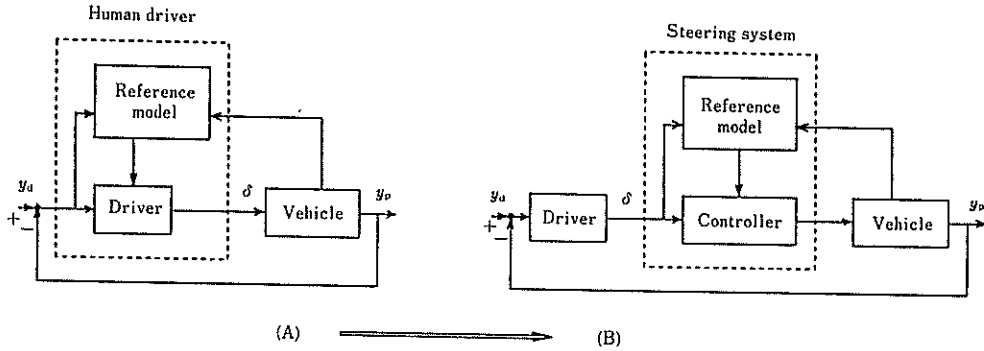


図1. 人間の適応制御特性を付与した機械の適応操舵系.

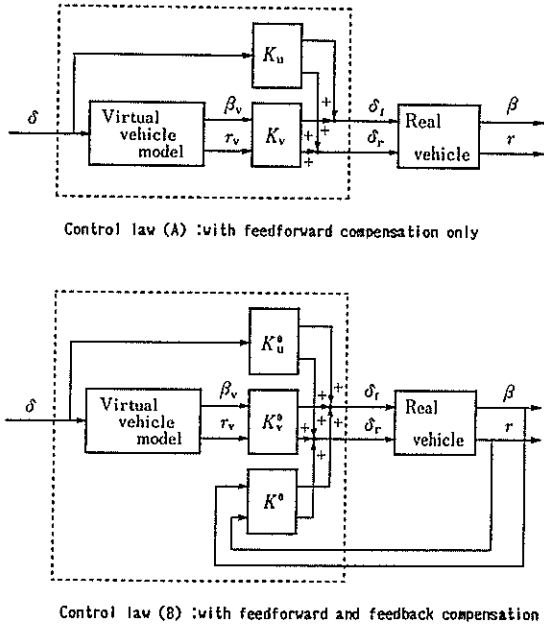


図2. モデル追従制御方式の四輪操舵(4WS)車の基本構成.

制御機能を自動車の操舵機構の中に持たせられれば、環境の変化に伴う機械の性能の悪化が抑えられることになる。その結果、運転中における人間の負担が減り操作ミスや事故の軽減に結び付くことになる。またこの制御方式を車両(四輪操舵車)の操舵方式に適用することにより操縦性・安定性は大幅に向上することになる。この考えを図1に示す。本研究ではそのような考えに基づいて、モデル追従制御理論により、高度な性能を持つ四輪操舵車を設計するための新しい制御方式を提案し

た。図2にこの制御系の基本系を示す。図2(A)はフィードフォワード補償のみの方式である。規範モデルの部分の補償が無ければ、単にハンドル操舵角を前後輪の操舵角に配分する比例操舵方式となる。また規範モデルの部分の補償は、動的補償要素を付加したことと同じ効果がある。図2(B)はフィードバック補償を加えた方式である。これは外乱により追従誤差が乱されたときに効果がある。

3. 規範モデルの性質

規範モデルとしての操舵応答特性をどのように設定するかが、モデル追従制御の効果を期待する上で最も重要である。一般に通常の車両の操舵応答の伝達関数は、いわゆる2次系として表すことができる。ここで伝達関数のパラメータは走行条件によって異なるが、共振周波数や減衰係数比は走行速度の関数で表される。そして高速になればほど共振周波数と減衰係数比が減少して操舵応答性や安定性が悪くなることが理論的に導かれる。そこで高速走行時においても中低速時の安定した操舵応答特性になるような規範モデルとすれば、高速時においても安定した性能が得られることになる。一例として、定常横すべり角が零となる中低速時約 50 km/h の安定した車両特性を規範モデルとし、弱 US 特性の実車両の車速が約 100 km/h で走行する場合に上に示した制御則を適用した。その場合共振周波数は 1.14 Hz から 1.94 Hz に高められ、減衰係数比も 0.919 から 0.975 と増大する。

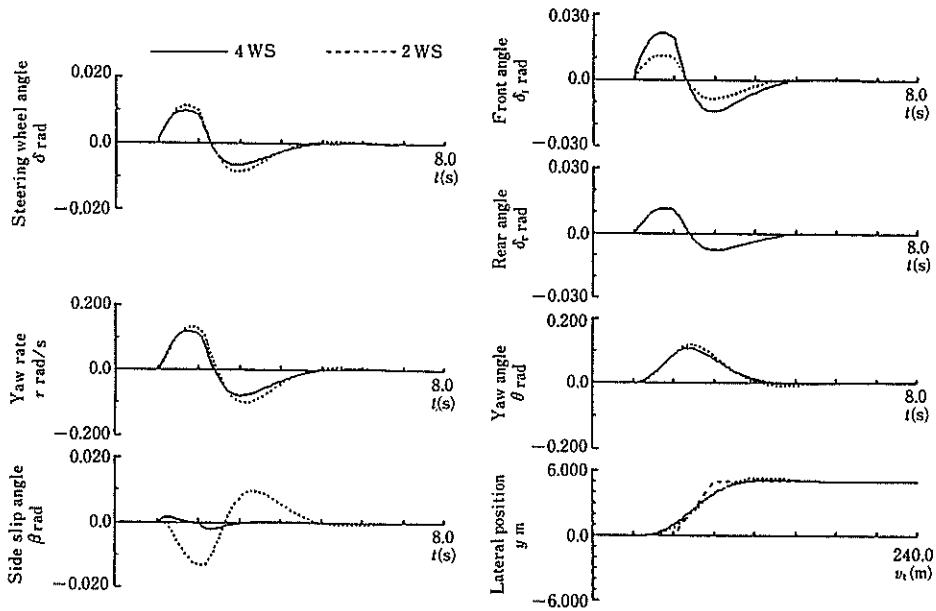


図3. 車線変更時の人間-自動車系の過渡応答.

4. 人間の操舵モデル

まえにも述べたように、経験を積んだ人間は高度で柔軟な操縦特性を示すことができる。しかしここではそうした高度な機能は自動車側に持たせて、平均的なドライバーにとっていかに高い操縦性・安定性が得られるか調べる。そのためここではドライバーモデルとして、操舵の反応遅れを考慮した前方注視点モデルという基本的な人間モデルを使用した。この人間モデルは、車両前方の予見地点におけるコースからの偏差をフィードバックしてハンドル操舵するものである。

以下にこのドライバーモデルを使用して、人間-自動車系の閉ループ系の特性を理論的に解析した結果を述べる。

5. 車線変更時の過渡応答

前述した制御方式の四輪操舵車と前輪操舵車の閉ループ特性を比較するため、車速 100 km/h で車線変更する時の過渡応答の一例を図3に示す。その結果によると、前輪操舵車と比べて特に横すべり角が極めて小さくなっている。またさらにヨー角や横偏位の変動が小さくなっており、大きくハンドル操作をしないで済んでいることも分

かった。

この人間と機械との閉ループ系の過渡応答はドライバーのパラメータに依存する。図4に示すのは、ドライバーの操舵ゲインが車線変更時の各変数の変動の積分自乗誤差に及ぼす影響である。図によれば、目標コースへの追従誤差は、ドライバーの操舵ゲインが小さいとき四輪操舵車のほうが小さくなっている。しかし逆に操舵ゲインが大きいと前輪操舵車の方が小さくなっている。この結果はコースへの追従性能が、ゲインの修正や適応によるドライバーの操舵努力に依存することを意味している。一方、車両のヨー角変動はドライバーの操舵ゲインによらず四輪操舵車の方が常に小さくなっており、制御負担の少ない安定したハンドル操作となっている。したがって目標コースへの追従性能は、車両の操舵方式にかかわらずドライバーの操舵努力に依存するが、四輪操舵車の場合は余計なヨー運動が抑えられるので、ドライバーのハンドル操作の負担が軽減され安定な走行が可能となる。

6. 急激な横風に対する応答

実車両の車速が 100 km/h の時に、横風を急激に受けたときの過渡応答を図5に示す。この計算

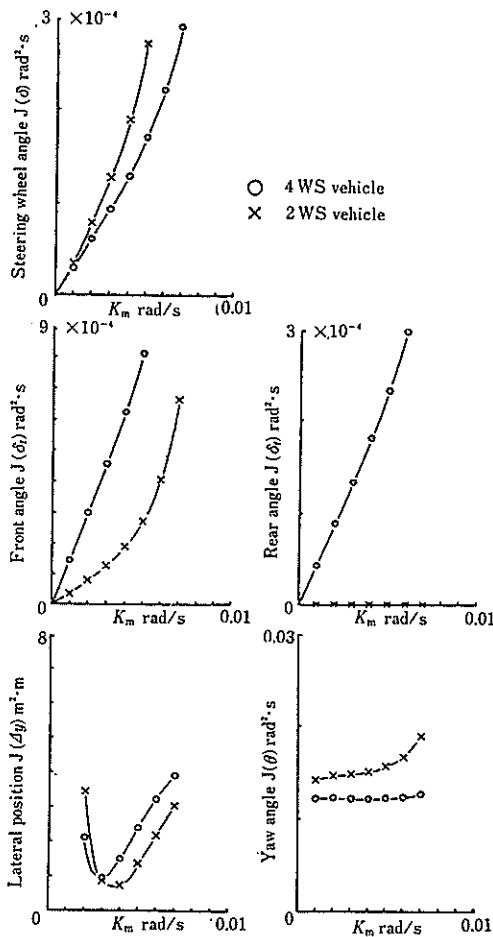


図4. 車線変更時の各変数の積分自乗誤差と操舵ゲイン。

例は1000Nの強さの横風が1秒間だけ急激に車体に作用する場合である。図5によると、フィードフォワード補償による制御則(A)の四輪操舵車は、前輪操舵車に比べて車体の変動が少ない。これは外乱による車体の変動をドライバがフィードバック補償によりハンドル操作することで、後輪が前輪と同位相ぎみに操舵されているためである。一方、フィードバック補償を加えた制御則(B)の四輪操舵車の場合、安定性が格段に向上しているため、ドライバはハンドル操作をそれほどしなくても済んでいる。それは前後輪がフィードバック補償により横風外乱に対して自律的に操舵されているからである。このように高い安定性が

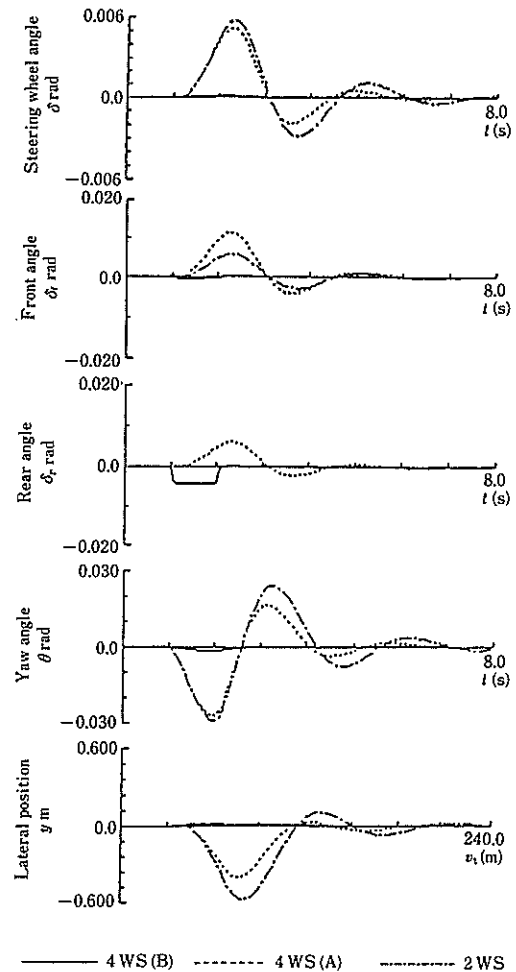


図5. 横風作用下の人間-自動車系の過渡応答。

得られるのは、通常の車両では外乱による車体の変動を人間がフィードバックにより修正動作をするのに対して、制御則(B)では操舵系自身が人間に代わって修正動作をすばやく行なうためと考えられる。

このフィードバック補償による直進安定性への効果は、横風の外乱が車体のどこに作用するかによって異なり、その作用点が重心から離れるほど顕著に現れる。図6には横風の作用する位置と積分自乗誤差の関係を示す。これから次のような性質が認められる。(1) 前輪操舵車に比べて制御則(A)の四輪操舵車は、車体やハンドル角の変動

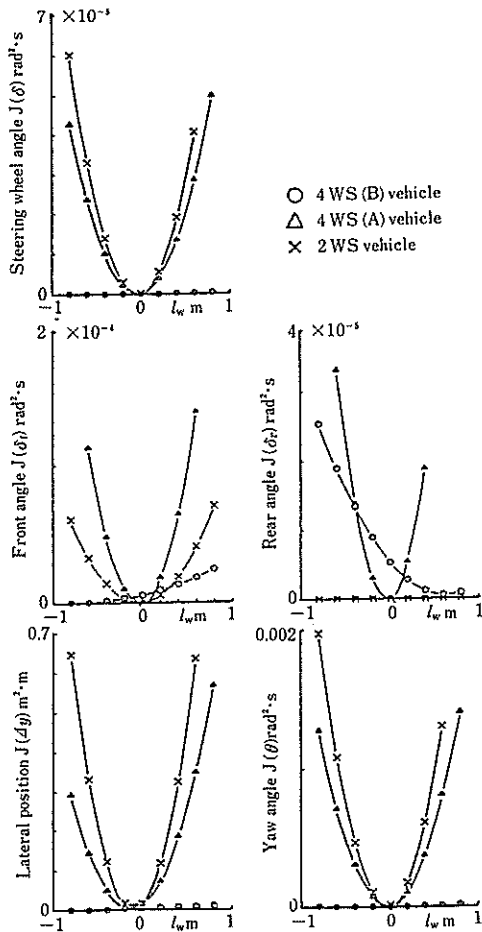


図6. 横風作用下の各変数の積分自乗誤差と空力中心.

は全体的に小さくなっており安定性が高くなっていることが分かる。(2) 制御則(B)の四輪操舵車では、前後輪が横風外乱に対応して自動的に操舵されるために制御則(A)に比べてさらに高い安定性が得られる。

7. 解析結果のまとめ^{5)~8)}

任意の仮想車両モデルに実車両の運動性能が追従するようなモデル追従制御方式による四輪操舵車について、人間を含めた閉ループ系の理論解析を行なった結果、以下の知見が得られた。

1) 車体の共振周波数などの動特性が改善され、フィードバック補償の有無にかかわらず、過渡的な操舵応答は大きく向上する。

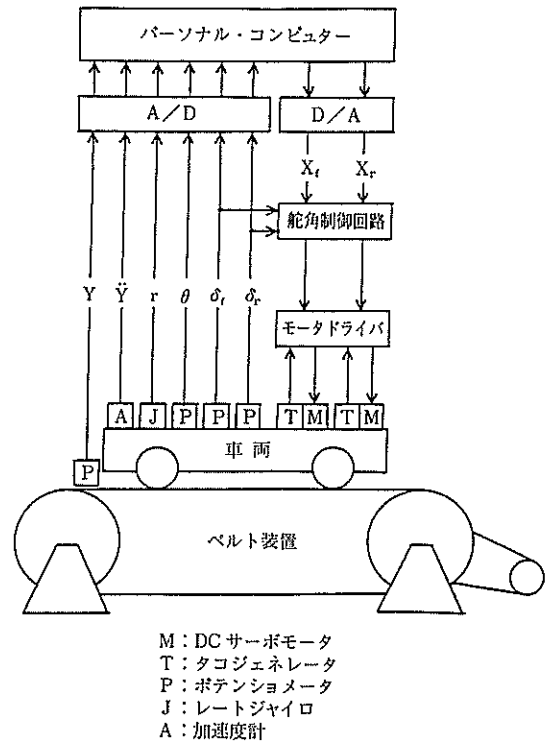


図7. 模型実験車の走行実験装置.

2) ドライバの操舵努力によりコースへの追従性が左右されるが、四輪操舵車の場合は変動が小さくなり、操作の負担が減り高い安定性を示す。

3) 横風に対する過渡応答によると、フィードバック補償を加えた場合は、外乱に対して車輪が自律的に応答するため、極めて高い直進安定性が得られる。

8. 模型車両の試作と性能の確認⁹⁾

図7に実験室の中に試作した模型の車両と、用いた制御系の基本的な構成を示す。用いた車両状態の感知センサは、横加速度を検出する加速度計、ヨーレイトを検出する振動ジャイロ、車体の横移動量と横向き角度を検出するポテンシオメータ、および車輪の操舵角を検出するためのポテンシオメータである。そして、これらの情報は16ビットCPUをもつマイクロ・コンピュータに入力して、適応制御の演算を行なう。そしてこの模型実験車を実験室の中の走行実験装置の上に走らせた。この実験装置により車線変更実験や直進走

行実験を行なって、制御性能を調べた。ただし実験装置の制約から走行速度は実車換算で 50 km/h 程度までの低速走行実験を行なった。その結果、計算機に内蔵した仮想モデルの特性に実車両の特性が追従できることが認められ、本研究で提案した制御方式が実際にも実現しうる可能性を示すことができた。

今後の課題と発展

本研究では環境変化や機械の特性変化に対し柔軟に対処する人間の適応性を解析し、適応制御の手法を利用して、その適応的な人間の機能を機械系に付与することにより、環境の変化に強くかつ操縦者にとって負担の少ない安全性の高い人間-機械系が設計できる見通しが得られた。ただし提案したような高度な制御方式を実現するハードウェアの構造やその信頼性については今後の課題である。ただ急速に進歩しているマイクロエレクトロニクスやメカトロニクス技術を利用すれば簡潔かつ効果的な操舵系が実現できると期待される。さらに機械の高性能化による人間の操作ミスや心理的・生理的な負担度などの解析を含めてより安全なヒューマンインターフェイスをめざす研究を進める必要があろう。

発表論文

- 1) Nagai, M.: Analysis and Estimation of Closed Loop Characteristics of Driver-Car Systems by Adaptive Steering Control", *JSAE Review*, 8, No. 1 (1987).
- 2) 永井: 適応操舵による人間-自動車系の閉ループ特性の解析と評価, 自動車技術会論文集, 35 (1987).
- 3) Nagai, M. and M. Mitschke: Adaptive Control Model Car-Driver and Computer Simulation of the Closed-Loop Systems, Proc. 10th IAVSD/IUTAM Symposium, Prague, 8, 1987.
- 4) Nagai, M., Kojima, Y. and Satoh, H.: Driver Decision and Control Process in Right-Turning at Intersections (Application of Fuzzy Theoretic Model to Accident Analysis), Proc. 4th IPC on Automotive Engineering, Melbourne, 11, 1987.

- 5) 永井, 橋ヶ谷: 仮想モデル追従制御による四輪操舵車の性能解析, 日本機械学会論文集, 53-496C, 12, 1987.
- 6) 永井, 大木, 橋ヶ谷: 仮想モデル追従制御による四輪操舵システムの研究 (第1報), 自動車技術会学術講演会前刷集, 872086, 10, 1987.
- 7) 永井: 四輪操舵システムの制御—現状と将来—, 自動車研究, 10, 5号 (1988).
- 8) 永井, 大木: 仮想モデル追従制御による四輪操舵システムの研究 (第2報) パラメータ変動の影響解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, 881042, 5, 1988.
- 9) 永井, 西沢, 沢: 四輪操舵車の制御 (仮想モデル追従制御方式の実験的研究), 第27回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 489-490, 8, 1988.

参考文献

- 10) Iguchi, M.: A New Design Concept of Vehicle Dynamics Based on Active Control, *JSME International Journal*, Ser. III, Vol. 31, No. 1, 1-7 (1988).
- 11) Sano, S. *et al.*: Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel Angle, SAE Technical Paper, No. 860625, Detroit (1986).
- 12) Takiguchi, T. *et al.*: Improvement of Vehicle Dynamics by Vehicle-Speed-Sensing Four-Wheel Steering System, SAE Technical Paper, No. 860624, Detroit (1986).
- 13) 入江ら: HICAS—Improving Handling Stability through Actively Controlling the Rear Wheel, 日産技報, No. 21, 15-28, (Dec. 1985).
- 14) 三田村ら: Mitsubishi New 4WD, 4WS, 4IS Integrated System, 三菱重工技報, 24-5, 535-540 (1987).
- 15) 藤岡, 石川: 最適制御理論の車両運動力学への応用—四輪操舵による車両運動性能の向上の可能性, 自技会論文集, No. 35 (1987).
- 16) 井口: 四輪操舵車の前後輪協調制御方式に関する理論的研究, 自技会論文集, No. 35 (1987).
- 17) 菅沢他: 前後輪のステア制御による操縦安定性向上の考案, 自技会前刷集, 871 (1987).
- 18) 伊藤他: 四輪操舵車の新しい制御法—モデル追従制御による方法, 計測自動制御学会論文集, 23-8 (1987).
- 19) 金井他: 自動車の適応ヨ-角速度操舵系の設計, 計測自動制御学会論文集, 23, 8号 (1987).
- 20) 永井: マン・マシン・システムの理論, 自動車技術, 39-5 (1985).