科学としてのロボティクス

—ロボットのセンサ・フィードバック制御を例題として—

川 村 貞 夫*

Science in Robotics

— An example of Sensor Feedback Control for Robots —

Sadao Kawamura*

Robotics has several aspects such as science, technology and art. Therefore, the purpose, method, and evaluation of robotic research are very different depending on the cases. This paper tries to clarify the difference between science and technology in robotics. Moreover, the relation between robotics science and human science is explained in this paper. As science in robotics, this paper point out the importance of synthetic science as well as analytic science. As an example of synthetic science, sensor feedback motion control based on linear transformation from vision to motion is explained and three conditions are revealed. Some simulation results demonstrate the efficacy of the feedback control. Finally, several issues concerning methodology of robot science are discussed.

Key Words: Science and Technology, Synthetic Science, Feedback Control, Methodology

1. は じ め に

ロボットの研究には様々な側面があり、その視点によっては、目的、手段、成果の評価が大きく異なる。ロボットは人工物ではある。しかし、生物や人間の機能に刺激を受けた人工物である。それゆえに、人間自身を対象とする研究とも表裏一体と考えることも可能であろう。また、科学、技術、芸術の混在した存在として、理解される場面も見受けられる。

しかし、本論文では、ロボットの研究の中で、科学としての位置づけを明確にすることの重要性を主張する。科学と技術と芸術の意味や意義は、厳密には分離できないかもしれない。けれども、これらを分離し、本論文で記述するロボティクスとしての科学を追及する方法論を提案する。本論文はロボティクスとして新しい概念を提案するものではなく、ロボティクス研究の方法論を再整理、再提案するものである。

科学としてのロボティクス研究を分かりやすく説明するために、筆者らの研究を例題として示す。これは、多関節構造のロボットにカメラ等の視覚センサを搭載した場合に、どのようなフィードバック制御を行うかという古くから知られている問題である。本論文では、運動学や動力学の非線形性があるにもかかわらず、視覚センサからアクチュエータへの線形変換行列が、

十分な働きをすることを紹介する。さらに、本結果が産業応用や人間科学としても興味深い可能性のあることを指摘する。

2. 科学と技術と芸術

今後のロボットは、科学と技術と芸術の各分野に、より大きく広がると予想される。そのような状況の中で、ロボティクスの研究を考えると、常に「科学」「技術」「芸術」の違いを明確にすることが重要と筆者は考える。まず、科学と技術は異なる。日本では、伝統的に「科学技術」と4文字での表現を行う。しかし、科学と技術は明らかに異なる内容を表現している。りんごを木から落とせることは技術である。一方、りんごが、なぜ木から落ちるかを説明することは科学である。科学として、りんごが落ちることを解明することから、りんごの運動のみならず、天体の運行を説明することができる。それでは、科学はレベルが高く、技術が低いかといえば、それは誤りであり、まったく性質の異なるものである。目に見えないぐらい小さいりんご（そのようなりんごがあったとして）を落とせる技術、人が寄り付けない危険な崖っぷちの木のりんごを落とせる技術、熟れたりんごのみを落とす技術など、仮に科学的に説明ができなかったとしても、優れた技術であり、人類に有用である。

一方、芸術と科学の違いは一般に理解されており、「科学芸術」とは表現されてこなかった。いままでは、精神的な豊かさと物質的な豊かさを分けて考えていたために、芸術と技術は、分離されてきた。しかし、物質的な豊かさをもたらす技術と精神的な豊かさともたらす芸術の境界は、科学からの距離を考えれば、

原稿受付 2009年10月4日

*立命館大学理工学部ロボティクス学科

*Ritsumeikan University

■ 本論文は提案性で評価されました。

必ずしも明確にする必要はない。したがって、むしろ技術と芸術を同様に理解したほうがよいと思われる。そこで、本論文の以下では、主に科学と技術について論じる。

3. ロボティクスにおける科学と技術の整理

3.1 科学と技術の関係図

本論文で考える科学としてのロボティクスを説明するために、ロボティクスの科学と技術の関係を Fig. 1 に整理する。Fig. 1 で、ロボティクスには、科学と技術が存在するとしている。科学には、分析科学と統合科学があり、技術には要素技術と統合技術があるとする。科学については後述するので、技術に関して簡単に述べる。

ロボティクスの技術は、明快な説明が可能である。すなわち、精神的な意味も含めて人間に役立つロボットや地球環境に役立つロボットを作る術である。その際、実現されることが重要であり、なぜ実現されたロボットが、人間や地球環境に有用な働きができるかを科学的に説明する必要はない（矢印⑥または矢印③から⑥）。

ロボティクスの要素技術は、ロボットに利用するために有用な要素の技術であり、ロボットシステム全体を構成するために、その要素の特性が重要である場合に対応する。また、統合技術は、各要素を統合して、ロボットシステムに仕上げる技術となる。

3.2 分析科学と統合科学

科学とは説明であるので、多くの他の科学では、対象を分析する。いわば分析科学となる。また、多くの場合には、この分析科学は対象を細かな要素に分解して、その各要素を調べることになる。ロボティクス分野でも、例えば関節構造のロボットダイナミクスがどのような方程式に支配されるかが、ロボティクス研究の初期に明らかにされた[1]。このような分析は重要であり、今後のロボティクスの科学研究に重要である。ロボット自身や対象物のモデリングは分析的に、可能な限り詳細に調べることが重要となる。特に、運動制御に関するモデリングは、参考文献[2]等を参考いただければ幸いである。

一方、対象を細かく分解して、分析科学で得られた成果の逆過程によって、細かな要素を足し合わせる方法でシステムを設計・実現しようとする、以下のような場合に困難を生じる。

(1) モデル化が困難な部分をシステムが持つ。

(2) システム全体が巨大で、細分化された部分の合成には多くの誤差を含む。

ロボットは、センサ、コンピュータ、アクチュエータの統合体となる。言い換えれば、ロボット研究は、感覚から運動への統合システム研究となる。今後、自由度が多くなり、より複雑な対象物体や複雑な環境で動作することを想定すると、上記の(1)(2)の困難性に直面することは容易に想像できる。

そこで、システム設計・実現としては、システムのモデル化困難な部分を許容し、分解された要素の単純な再合成でないシステム実現方法を再提案する必要がある[3]。いわば、システムの細部にかかわらず、巨大なシステムであっても、システム全体としてうまく機能する方法を新しく開発する問題が存在する。さらに、統合の科学とするためには、そのようなシステム全体がうまく機能できることを説明しなければならない。

例えば、多くのアクチュエータで駆動する自由度の多いロボットや群ロボットを、適当な入出力関係を、ニューラルネット、ファジィ制御、創発的手法等で動作させて、望みの機能が果たせた場合を考える。この場合、ある環境（条件）では上記(1)(2)の問題を克服できる場合がある。しかし、なぜうまく機能するかの説明がなければ、高度な統合技術となり得る可能性はあっても、統合科学とは言えないと筆者は考える。

3.3 ロボット技術利用の人間科学

人間や動物に似たロボットに対して人間はどのように反応するか、ロボットの顔表情や運動から喜怒哀楽を人間が感じるかななどの研究は、この意味では、技術としてのロボットを利用した人間科学（脳科学）（矢印⑦）を意味している。したがって、この段階では、ロボティクスの科学ではないので、その成果は人間科学として評価されるべきであろう。しかし、このような研究分野が進展し、人間の顔表情や動作をロボットが観察して、ロボットが人間の喜怒哀楽を理解できる原理を解明すること（矢印⑩）はロボティクスの科学となる。ただし、この場合には、人間の実際の顔表情をロボットに認識させることが目的となるので、人間に似たロボットを作る研究アプローチに限定する必要はない。

3.4 産業用ロボットのフィードバック制御

関節構造の産業用ロボットのフィードバック制御を考えると、そのロボットダイナミクスは、ロボットが実現された当初は不明確であった。慣性行列の非対角項の存在は予想されたにもかかわらず、関節ごとの独立したフィードバック制御で、動作することは産業用ロボットで実現され、技術としては完成した。しかし、なぜそのような関節ごとの制御で運動の安定性が保証されるかは（矢印④から⑤）、産業用ロボットの出現から、20～30年後に証明された[4]。

この例からも分かるように、ロボティクスでは、科学的成果が先にあって、新しい技術が生まれる場合ばかりではない。20世紀の物理学、生命科学を例として、我々は基礎科学の応用が原子力利用や製薬に結びつた印象を強く持っている。したがって、科学からの技術の方向性を暗黙のうちに受け入れている。しかし、ロボティクスでは、ロボットが実現されても、科学的説明が未完成であることも多い。したがって、すでに実現された技

Fig. 1 Relation between science and technology in robotics

術であっても、科学的な説明を行う努力を惜しんではならないと筆者は考える。これは、単に既存の技術の後追いの説明をするだけではなく、科学としての普遍性を確立することから、さらに別の技術開発目的の明示(矢印⑤)や新しいロボット実現(矢印⑧)が期待できるからである。

4. 統合科学の一例—線形変換による制御

4.1 問題設定と研究経緯

ロボットは、センサ、コンピュータ、アクチュエータ(エネルギー源を含む)の統合体と理解することができる。各要素には少なからず非線形性があり、このような統合体を高度に機能させるためには、特有の方法を開発する必要がある。ここでは、統合科学としての例として、我々の研究を紹介する。

まず、関節構造のロボットがカメラ等のセンサを有する場合のセンサ・フィードバック系を想定する。一般にカメラ等のセンサ座標系は、関節構造の座標系とは異なるので、何らかの座標変換が必要となる。最もオーソドックスな方法は、センサ座標系で得られたロボットの手先位置と目標位置を逆変換によって、関節角座標系に直し、関節角座標系でフィードバック制御を与えることである。しかし、運動学情報の誤差(ロボットやカメラの据付誤差、リンクの長さ誤差、リンクのたわみなど)によって正確な逆変換は現実には困難である。一方、逆変換を用いずに、センサ座標系で直接フィードバック入力を計算し、転置ヤコビ行列を用いる方法が提案された[5]。さらに、ヤコビ行列のリンク長さと関節角度の情報に関するロバスト性が証明された[6]。これによって、ロボットの運動学的情報が不完全であっても、ロボットの手先位置を目標位置に移動させるフィードバックの存在が証明された。しかし、なお関節角度情報を前提としている点やロバスト性の定量的議論等に問題を残した。

一方、ロボットダイナミクスに対する安定性は想定せず、視覚座標系から関節角座標系への線形近似による変換が議論されていた[7]。また、人間が手先を主に視覚情報に基づいてフィードバック制御する際の人間のモデルも研究が進んだ。簡単な観察からも理解できるように、人間の筋肉等にあるセンサから計測される情報は、運動学的には、あまり正確ではない。それゆえ閉眼状態で両手の指先を合わせることは容易ではない。目を開いて視覚情報も加えることにより正確に指先を一致させることができる。この観察は、エンコーダのみを利用する産業用ロボットの不自然さを端的に表している。

それでは、視覚等のセンサを利用する場合、フィードバック制御に、何が最低限要求される条件であろうか? この問題は、Fig.1において、技術からの問い(矢印④)、人間科学からの示唆(矢印⑩)、科学としての過去の結果から設定されたこととなる。この問題に対して、最近我々が得た結果のみを以下に紹介する。詳細な証明は、文献[8]を参照されたい。

4.2 システムの記述と線形変換による制御

ここでは、問題を簡略化するために、重力は作用せず、関節の冗長性はない回転関節からなる2自由度のロボットとする。ロボットダイナミクスを以下で与える。

$$R(q)\ddot{q} + \left(\frac{1}{2}\dot{R}(q) + S(q, \dot{q})\right)\dot{q} = \tau \quad (1)$$

ここに、 $q = (q_1, q_2)^T$ 関節角度、 $\dot{q}$ 関節角速度、 $\ddot{q}$ 関節角加速度、式(1)左辺第2項遠心力、 τ 入力トルクである。また、センサ座標系を $p = (x, y)^T$ とし、センサ信号として、ロボットの先位置 p が計測できるとする。さらに、手先位置の目標位置を p_d と表す。ここで、ヤコビ行列 $J(q)$ は以下とする。

$$J(q) = \frac{\partial p}{\partial q} \quad (2)$$

このヤコビ行列が特異点にならない範囲での運動を想定する。このような非線形特性をもつ対象に、以下の線形変換による制御入力を与える。

$$\tau = M(K_p(p_d - p) - K_v\dot{p}) \quad (3)$$

ここに、行列 $M(2 \times 2)$ は、正則な定係数の行列で、センサ座標系でのPDフィードバック入力をアクチュエータ座標系入力に変換する線形変換である。また、 $K_p(2 \times 2)$ $K_v(2 \times 2)$ は、それぞれ位置と速度のフィードバックゲイン行列である。式(3)は、センサ座標系での線形PDフィードバックにさらに線形変換行列 M によって、関節トルクを与えることを意味している。したがって、この制御入力式では、ロボットの関節角計測は必要ないので、エンコーダ等の関節角度センサは不要である。

4.3 安定条件

安定解析は、リアプノフ関数によって行われる。(詳細省略)結果として、以下の三つの条件を得る。以下では、フィードバックゲインを次のように設定する。

$$K_p = \rho I, \quad K_v = a\rho I \quad (4)$$

ただし、 a および ρ は正数である。

【第1条件(幾何学条件)】

$$MJ(q) > 0 \quad (5)$$

この条件は、両辺から角速度を掛けた二次形式で考えると以下となる。

$$\dot{q}^T MJ(q) \dot{q} = \dot{\tilde{p}}^T \dot{\tilde{p}} > 0 \quad (6)$$

ただし、 $\dot{\tilde{p}} = M^T \dot{q}$ として、変換行列 M によって角速度が変換されたセンサ座標での速度ベクトルである。式(6)では、センサ座標での速度 $\dot{p}$ と変換行列によって構成される $\dot{\tilde{p}}$ の内積が正、すなわち二つのベクトルの角度が $\pi/2$ 以内であればよいことを示している。このことは、運動の安定性を保証する条件として理解しやすい。

次に、動的な第2条件が必要となる。

【第2条件(動的条件)】

$$aMJ(q) > \frac{1}{2\varepsilon}(J^T - M)^T(J^T - M) \quad (7)$$

ただし、 ε は1程度の適当な正数でよい。式(7)は、位置フィードバックゲインと速度フィードバックゲインの比率 a に一定の大きさを要求している。これは、運動方向が目標運動方向でない場合に位置フィードバックゲインのみが大きいと振動的になることを、ダンピング効果で振動を抑制していると判断で

きる。

最後に、位置と速度のフィードバックゲインに共通する大きさ ρ の満たす条件が次式で得られる。

【第3条件（ゲイン条件）】

$$\left[aMJ(q) - \frac{1}{2\varepsilon}(J^T - M)^T(J^T - M) \right] \rho > \alpha J^T M^{-1} R + c_1 I \quad (8)$$

ただし、 $0.5 < \alpha < 1$ とすればよく、 c_1 はもとのダイナミクスのパラメータ値から決定される正数である。

4.4 シミュレーション結果

上記の条件は、リアプノフの安定性の議論の中から導出されたものであり、安定性の十分条件となっている。この条件が満足されない場合に直ちに不安定となるとは限らない。しかし、シミュレーション結果から、この安定条件は、実質的には必要十分条件に近い条件を与えていることが示唆される。

ここでは、2 自由度のロボットで、センサ座標系を直交座標系として取り扱う。以下のシミュレーションでは、サンプリングタイムは、1 [ms] であり、ルンゲクッタ法によって求めた。各パラメータはリンク長さ $L_1 = L_2 = 0.34$ [m]、アームの質量 $M_1 = 1.93$ [kg]、 $M_2 = 1.52$ [kg]、慣性モーメント $I_1 = 0.0141$ [kgm²]、 $I_2 = 0.0188$ [kgm²] とした。また、変換行列 M を次のように与える。

$$M = \begin{bmatrix} -1.0 & 0.0 \\ -1.0 & -1.0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

【第1条件（幾何学的条件）検証シミュレーション】

安定条件を確認するため $(MJ(q) + J(q)M^T)/2$ の固有値を計算し、二つの固有値がともに正の領域を Fig. 2 に示す。図中灰色領域が、二つの固有値が正の領域で、安定性の第1条件を満たす。さらに、Fig. 2 中で、運動が安定な場合の軌跡を示す。ただし、初期位置 $(x, y) = (0.4, 0.4)$ 、目標位置 $(x, y) = (-0.2, 0.5)$ とした。

一方、Fig. 3 では、目標点を安定領域外に設定した場合を示

Fig. 2 Stable region and simulation result with $(K_p, K_v) = (10, 5)$, $a = 0.5$

しており、振動が継続し、目標点に収束していない。初期位置 $(x, y) = (0.4, 0.4)$ 、目標位置 $(x, y) = (-0.4, 0.0)$ とし、より安定化を図るために速度フィードバックゲインを増加させて、 $a = 1$ とした。

他の運動終了点を確認すると、安定領域内ではすべて目標点に収束した。安定領域外では目標点に収束する場合と収束しない場合があった。これは、安定領域の設定は、任意の角速度に対して保証し、シミュレーションでは、実際の運動で現れる限定された角速度方向のみにより、式 (6) が満足されたと考えられる。

【第2条件（動的条件）検証シミュレーション】

速度フィードバックゲインが小さい場合を Fig. 4 に示す。初期位置 $(x, y) = (0.4, 0.4)$ 目標位置 $(x, y) = (-0.2, 0.5)$ とした。速度フィードバックゲインを小さくすると、式 (7) のゲイン比率パラメータ a が小さくなり、第2条件を満足できなくなる。この場合は、Fig. 2 と、初期位置、目標位置が同じで、位置フィードバックゲインの値も同じであるが、速度フィードバックゲインとの比率 a が、0.5 から 0.1 に変化している。また、位置フィードバックゲインを下げて、比率 a を増加させると、安

Fig. 3 Simulation result with $(K_p, K_v) = (10, 10)$, $a = 1$

Fig. 4 Simulation result with $(K_p, K_v) = (10, 1)$, $a = 0.1$

Fig. 5 Simulation result (K_p, K_v) = (0.4, 0.2), $a = 0.5$

定に目標位置に収束することも確認している。したがって、理論的に導出された速度フィードバックゲインとの比率が、安定条件判別として実際に有用であることを確認できた。

【第3条件（ゲイン条件）検証シミュレーション】

速度フィードバックゲインとのゲイン比率パラメータ a は、小さくせずに、ゲイン全体が小さくなる場合を Fig. 5 に示す。ただし、初期位置 $(x, y) = (0.4, 0.4)$ 、目標位置 $(x, y) = (-0.2, 0.5)$ とした。この場合も振動的となり、目標点には収束しない。

4.5 考察

4.5.1 統合科学から新しいロボット実現へ

本研究では、視覚からのフィードバック制御によって運動を生成するための最少情報は何か？との問いに対して、少なくともセンサ座標系での目標手先位置と実際の手先位置の差と速度が分かれば十分であることを証明した。その際、手先位置の絶対位置を求める必要はない。したがって、動力学的情報のみならず運動学的情報も不要と結論づけられる。この結果は、産業への応用として重要と思われる。

産業応用としては、分解能の高いエンコーダによって、ロボット手先を目標点に収束させることは必要なく、視覚情報のみで十分であるので、エンコーダ等の角度センサが、技術的・経済的に取り付け難い場合等に有効な手法となると思われる。この結果は、Fig. 1 矢印⑤⑥または矢印⑧によって、新しいロボットの実現を期待したい。

また、一般化した結果が得られれば、実現すべきロボットは、生物型であってもよいし、非生物型であってもよい。他の要求される条件から形態は決定されればよい。したがって、科学としてのロボティクスから見れば、ロボティクスとしてのアイデンティティは生物型形態のみにかかわる必要はない。例えば、製造装置や情報端末機器で、空間的、予算的に制約があり、センサ座標系と駆動座標系が異なる場合には、本研究結果に基づいた設計が利用できよう。

4.5.2 統合科学から身体運動科学へ

本結果は、人間のモータコントロールの科学にも一定の示唆を与えると期待される。視覚からのフィードバック制御において、動力学的情報も運動学的情報も不要であり、適切な線形の変換行列のみが重要となっているので、人間の身体運動モデル

を検討する際においても、必ずしも複雑な非線形変換を行う必要がないことを意味する。事実、本論文のようなロボットの構造ではなく、人間の筋骨格構造に近いシステム（2関節6筋モデル）においても、本方式と同様な線形変換行列で十分であることを証明している [9]。さらに、センサ座標系を極座標とすれば、第1条件は、運動の全空間で満足できることも容易に確認できる。また、極座標または視空間と2関節6筋のような筋骨格系の駆動空間との線形性も報告されており [10]、線形変換が適用できることが示されつつある。これらの結果から構成可能な運動仮説は、人間は複雑な非線形変換または計算（運動学変換、動力学計算）をせず、単純に線形に近い写像で、筋入力を構成しているのではないかと。となる。本仮説が正しいかは、今後の研究成果に期待したい。

5. おわりに

筆者が考えるロボティクスにおける科学について、論じた。さらに、最近の筆者らの研究成果を例題として紹介した。科学は説明であると考えられる。しかし、何をもって説明が完了してきたかに関しては、意見が分かれる可能性もある。また、ロボティクス研究の方法論の再整理、再提案が、本論文の目的である。方法論であるがゆえに、本論文の記述内容が唯一の方法論である保証が必要はないことは明らかであろう。

以下に、本論文の内容と関連した個人的意見を述べる。今後の議論への話題提供となれば幸いである。

- ・産業界で活躍する研究者・技術者にとって、科学という言葉には距離を感じるかもしれない。しかし、本論文の内容に従えば、その距離はそれほど大きくない。産業界に役立つロボット実現のために本質を思考すれば、おのずから科学とならざるを得ないのではないかと。科学としてのロボティクスを産業界も考える時期ではないかと。
- ・これまでのロボット実現では、いろいろな要素を多く利用して高機能・高知能を実現しようとしてきた。この方向も間違いではない。例えば、従来よりももっと多種・多数のセンサを利用する場合に、どのように信号処理を行うかなどのロボティクスとしての普遍化は、まさに科学となる。一方、これとは逆方向に、どれだけ少ない要素と機能で、所定の目的を達成できるかを証明することも、また科学である。いわば「ロボットの最小実現」である。このような最小実現は、産業界にニーズにも合う。
- ・本論文では、統合科学を強調している。しかし、ロボティクスにおける分析科学もまだ不十分であり、多くの研究者が挑戦すべきである。例えば、柔軟物体や摩擦に関しては、従来から研究が行われているが、まだ不十分であり、今後も興味深い成果が期待される。その基盤となるものは、分析科学である。
- ・一般に、科学であるから実用には役立たなくてもよいとの意見も聞く。もちろん、知的興味から開始した研究のすべてが、すぐに役立つことはあり得ない。一方、社会ニーズからの研究においても、ロボティクスの技術のみならず科学として解決できる（すべき）課題も多く残されているように思える。例えば、今後の産学連携では、企業ニーズに

応える解決法を、科学として作りだせるかが大学・研究機関に問われている。

謝 辞 本研究は科研費特定領域研究「移動知」(20033021)の支援を受けた。ここに謝意を表す。また、シミュレーション結果等のとりまとめには、立命館大学大学院生早矢仕侑治氏に感謝します。

参 考 文 献

- [1] R.P. Paul: Robot Manipulators. MIT Press Cambridge, 1981.
- [2] 川村貞夫: “ロボットの運動制御のためのモデリング”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.312-317, 2000.
- [3] S. Kawamura and N. Sakagami: Planning and Control of Robot Motion based on Time-Scale Transformation. Advances in Robot Control, Springer, editors S. Kawamura and M. Svinin, pp.157-178, 2006.
- [4] S. Arimoto and F. Miyazaki: “Stability and robustness of PD feedback control with gravity compensation for robot manipulator,” Robotics research, First international symposium (ed. M. Brady and R.P. Paul), pp.783-799, 1986.
- [5] M. Takegaki and S. Arimoto: “A new feedback method for dynamic control of manipulators,” ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.103, pp.119-125, 1981.
- [6] C.C. Cheah, S. Kawamura and S. Arimoto: “Feedback Control

for Robotic Manipulator with Uncertain Kinematics and Dynamics,” Proc. of the IEEE Robotics and Automation, vol.4, pp.3607-3612, 1998.

- [7] 満田隆, 丸典明, 富士川和延, 宮崎文夫: “逆運動学の線形近似に基づくビジュアルサーボ”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.5, pp.743-750, 1996.
- [8] 川村貞夫, 早矢仕侑治, 満田隆, 植村充典, 関本昌紘: “視覚から運動への線形変換に基づくフィードバック制御の安定性—ロボットにエンコーダは不要か?—”, 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2K1-01, 2009.
- [9] 早矢仕侑治, 川村貞夫, 満田隆, 植村充典, 関本昌紘, 伊坂忠夫: “人間の筋構造を有するロボットのロバト・センサフィードバック制御”, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス学術講演会予稿集, 2009.
- [10] 満田隆, 川村貞夫, 関本昌紘, 植村充典, 伊坂忠夫: “筋骨格モデルにおける手先座標から筋長へのマッピングの線形性評価”, 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演 (SI2008) 論文集, pp.7-8, 2008.

川村貞夫 (Sadao Kawamura)

1986 年大阪大学基礎工学研究科博士後期課程修了。1995 年立命館大学理工学部ロボティクス学科教授。現在に至る。多関節構造体の運動知能, 学習制御, 水中ロボットなどの研究に従事。工学博士。IEEE などの会員。(日本ロボット学会正会員)