

慶應義塾大学理工学部広報誌
<http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai>

K y u r i z u k a i

新版 窮理図解

2011 JANUARY
no.

06

慶應理工の

モデルベース制御

モデルベース制御で
人や社会に役立つシステムデザイン

システムデザイン工学科

た か は し ま さ き

高橋正樹

(専任講師)



高精度な制御技術で 人や社会に役立つ システムをデザインする

人や社会のニーズを実現するモデルベース制御

人の移動や荷物の運搬に便利な自動車、都心の一等地に多くの居住スペースを提供する高層マンションなど、技術の発達は人々の暮らしや社会を便利にしてきた。しかし、人間を中心に見直すと、車酔いはなくなり、高層ビルが地震や風で揺れるときの不快感も改善されていない。こうした技術と人間との関わりに着目し、「人間にとっての安全・快適」という視点で見直す試みがなされている。モデルベース制御で人々や社会に役立つ製品、システムの開発に貢献している高橋専任講師に話を聞いた。

人や社会と機械の より良い関係を実現する

「モデルベース制御」とは、制御したいシステムをモデル化し、そのモデルに対して制御技術を開発して効率的な制御を実現する手法である。この手法は、シミュレーションを行いながら制御技術を開発していけるというメリットがある。しかし、モデルの精度が悪かったり動作環境が実際と違ったりしていると、シミュレーション通りに動かない場合がある。そのため、動作環境を想定

した正確なモデル化と、環境変化・モデル化誤差に対応できる制御系設計が重要になるという。

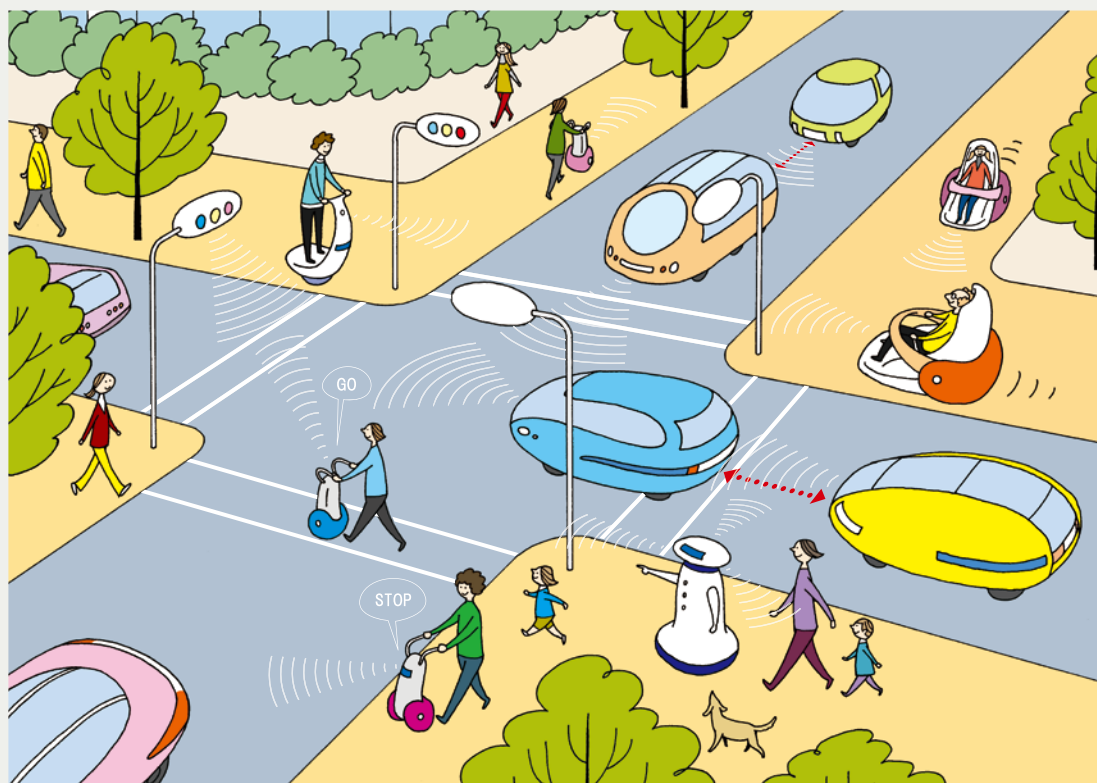
「高精度なモデルベース制御をするためには動作環境を含めたモデル化が欠かせないのですが、特に難しいのが利用者を想定することです。人間は独自の判断で行動するので、モデル化が難しいのです。しかし、実社会で利用されるシステムの開発のためには利用者を含めたモデル化は避けられません」と高橋正樹専任講師は語る。

高橋さんが研究テーマとしてロボットや自動車、建物など、人や社会と関わりの深い領域を選んできたのは、モデルベース制御を活用することで、人や社会に役立つ製品やシステム開発に貢献することを目指しているからだ。

ロボットの自律行動を制御する

病院内での消耗品や備品の運搬作業を自動化する案内・搬送ロボットの研究にも、モデルベース制御が生かされている。

「案内・搬送ロボットは病院内を自律的に行動することを目指しており、その制御技術も人間社会の中でロボットがどう振る舞うべきかを重視して開発しています。そこで重要になるのが、案内・搬送ロボットを見たときの人間の反応です。驚いて立ち去る人もいれば、興味を感じ



制御技術で安全・快適な社会を

制御技術は、日常生活をはじめ産業から宇宙まであらゆるところで使われている。その技術が進展すれば、図のように、自動車や案内・搬送ロボットなどもより安全に快適に利用できるようになるだろう。

て近寄る人もいるでしょう。ロボットが過去の行動の履歴や現在の状況から目の前の人間の行動を予測・判断して、適切な対応ができるように改良しているところです。また、ロボットに対する認知度は低く、社会にロボットが導入されるためには大きな壁があると感じています。ロボットを受け入れてもらうためには、ロボットを見てもらい、理解してもらうことが大切です」。

そのために欠かせないのが現場での実験と観察だ。病院に足を運んで、ロボットの視点になって、実際に荷物を運ぶ看護師の動き、周囲の人々が看護師を見たときにどのような行動をとるか、車椅子の人や松葉づえの人の行動も観察の対象になる。

「実験や観察はロボットを製造・開発している企業の方々や学生と一緒に大勢で行います。その結果を全員で話し合い、看護師とその周囲の人々の行動から特徴的な部分を抜き出し、必要な要素技術を開発していきます。現場に出向くことでいろいろな発見があります。例えば、研究者は新しい技術を導入して高性能なロボットを作りがちですが、実際の現場で荷物を搬送するために必要な技術は速く移動するための技術ではありません。また、極端に安全性を重視した設計を行うと、環境が時々刻々と変化することに対応できずにロボットが停止して動かなくなってしまう。現場に特有の障害物を認識する技術や、現場に合わせた適切な速度で回避する技術などが必要になります」。

地震や風から建物を守り 快適性も向上させる

社会基盤との連携で世の中の役に立っているモデルベース制御もある。それが地震から建物を守る免震構造の制御技術だ。これまでの免震建物は地震の規模を事前に想定し、それに対応できる建物を設計するというものだった。それに対して高橋さんは、地震動の新しい予報・警報システムを積極的に活用したアクティブな免震制御を考えている。

「緊急地震速報が伝える情報を活用した免震制御を提案しているところです。



先端分野で活躍する制御技術

緊急地震速報の情報をもとに、個々の地震に対応する免震制御を行ったり、高層ビルの振動制御を行ったりできる。人工衛星などの宇宙機の制御技術は、エレベーターロープの振動制御など地上の問題の解決にも応用可能である。

震源位置、地震の規模があらかじめ分かっている場合、建物の免震制御の性能を向上させることができます。大きく揺れるブランコも、揺らすタイミングを工夫するだけでその揺れを抑えられるように、震源から伝播してきた地震動による建物の揺れを打ち消すように免震装置を制御することで、効率的に揺れを抑え、安全性の高い免震制御が実現できます」。

地震動が伝播する経路や地盤構造を考慮した地面の揺れ方に関する先行研究の知見と、緊急地震速報が伝える地震の情報とを組み合わせた高橋さんの手法は、社会基盤の整備が急速に進展していく中で、新しい免震制御として注目されている。

「このアクティブな振動制御は地震だけでなく、風によるビルの揺れ対策にも利用できます。高層ビルが増えていくに従い、新しい予報・警報システムと連動したビルの振動制御といったニーズも今後は増えていくものと予想しています」。

人工衛星の制御ノウハウを エレベーターロープの制御に活用

モデルベース制御によって、宇宙空間で稼働する機器の制御技術も開発している。小型の人工衛星の姿勢制御もその一例だ。近年の小型衛星は電力消費が増え、大型で柔らかくて軽い太陽電池パネルを備えるようになっている。この状態でカメラを搭載した衛星本体が観測点の方に向きを変えると、その動きで柔らかな太

陽電池パネルが揺れてしまう。その揺れの影響でデジタルカメラの手ぶれのように撮影した画像がゆがんでしまうという。

「衛星の軌道によっては、衛星が地球上の同じ観測点を撮影する位置に来るのに数日かかることがあります。現在、深刻な問題になっている環境変化が起きている場所や、自然災害の現場など、一度に複数の観測点を撮影したいという要求があります。その場合、速やかに衛星本体の姿勢を変更したいのですが、太陽電池パネルなどの柔らかい構造物が揺れてしまう問題があります。そこに制御技術を適用することで、揺らさずに速やかに姿勢を変更することができます」。

柔らかな構造物に力を加えると全体が大きく揺れるという現象は、人工衛星に限ったことではない。類似する問題は地上にあるエレベーターのロープにも見ることができる。

「建物の高層化によって、エレベーターのロープも長くなり、振動が問題になっています。人工衛星用の揺らさずに高速に姿勢を変更する制御技術を、地上にあるエレベーターロープに適用できるのが数学や力学をベースにしたモデルベース制御のメリットです」。

多方面での活用実績を持つ「モデルベース制御」だからこそ、これからも人々の暮らしや社会生活を豊かにしていくに違いない。

(取材・構成 渡辺 馨)



力学と制御を通して 世の中と関わっていききたい

人々のニーズを掘り起こし、人や社会が求める製品、システムづくりをモデルベース制御で実現する高橋正樹さん。スポーツに燃えていた学生時代、数学や物理は得意科目だったが、何のために学んでいるのか疑問を持っていたという。しかし、大学で受けた講義をきっかけに力学や制御の面白さに目覚め、それからというもの研究三昧の日々が続く。しかもそのスタイルは人や社会と積極的に関わりながら研究を進めるというもので、高橋さんの行動範囲は研究室から大きく飛び出し、その視線は世の中に向いている。

——どんな学生生活を送られましたか？

思い出すのは、勉強よりもむしろサッカーとスキーに明け暮れていた日々です。サッカーは小学生の頃から始めて、11人がそれぞれ異なる役割を持ってゲームを作っていくチームプレーが楽しくて続けました。そんな毎日でしたので、将来研究者になるなんて当時の自分からは想像もできません。それに今でこそ制御工学と力学を専門にしていますが、高校時代の私にとって物理は「文系科目よりは得意」という程度でした。

——では制御工学や力学に関心を持つようになったのはいつ頃ですか？

私が力学に関心を持ったのは大学に入ってからです。高校時代には、教科書に書かれている公式が実際に社会の役に立っているという意識、あるいは身近な現象を理解し説明するために必要なもの

だという意識はほとんどありませんでした。今思えば、もっと早く気付いておけばよかったです。

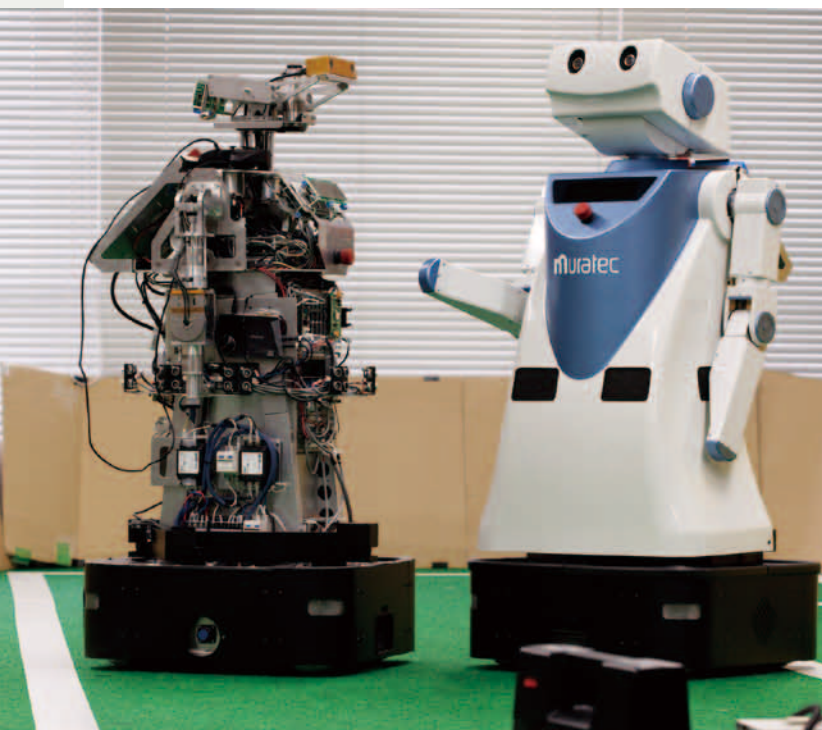
——慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科に進学されたんですね。

ええ、実はシステムデザイン工学科の1期生です。新設されたばかりのこの学科を選んだきっかけは、システムデザイン工学科の理念にあったように思います。学科パンフレットには、「これからの社会に対応できるシステムを作るには機械系と電気系の双方の知識が必要になるし、システムの設計、解析、評価を考えることができる人材の育成を目指している」と書かれていました。こうした、いくつかの知識を組み合わせる全体をデザインするという発想に出合ったとき、素直にそうだなと思ったからです。

入学当時は新設学科ということもあ

り、すべてが整っているわけではありませんでした。しかしそれを補って余りある先生方の熱意と創意工夫に満ちた講義が、私たち学生の好奇心を満たしていました。特に力学と制御工学の講義は私の意識を大きく変えました。講義を担当されていたのが私の恩師でもある吉田和夫先生だったのですが、高校時代に学んだ数学や物理、これから学ぶ力学の法則が、単なる数式ではなく人や社会の役に立つ道具として使えるし、多くの現場で活用されているということを、分かりやすく説明してくださったのです。

問題を解くことだけに関心があった数学や物理が、実は私たちの日常生活に深く関わっていることに驚くとともに、物理の新たな一面を垣間見ることができ、もっと知りたいと思うようになったのもこの体験がきっかけでした。





——吉田先生の講義が物理の印象を大きく変えたのですね。

最初の講義で吉田先生は、アメリカのワシントン州の海峡に架かるタコマナローズ橋の映像を見せてくださいました。この橋は、架橋後間もなく、想定した耐用範囲内の強風にあおられて落橋したのですが、その様子が鮮明な記録映像として残されていることでも有名なので知っている方も多いと思います。力学や制御のもつ役割を強く意識した瞬間でした。

そのときの印象が強かったこともあって、3年生の秋に研究室を決めるときも吉田研究室を訪ね、見学後に先生のもとで勉強しようと決めました。講義中の先生は優しく、分かりやすい解説を心がけてくださるのですが、研究となると非常に厳しく、随所的な指摘が入ります。学生を指導する立場となった今、そうした姿勢も見習いたいのですが、難しさを実感し、日々格闘しています。

残念ながら2008年に吉田先生は他界され、もうお話をうかがうこともできません。今は先生からの言葉を頼りに少しでも近づけるように日々努力を積み重ねているところです。

——他に大学の教員としてどんなことを心がけていますか？

学生の活動範囲が研究室の中だけにならないように、なるべく外部との関わりを持てるよう工夫しています。他大学との交流や、海外の人々と接した経験は、彼らの研究生活だけでなく、卒業後にも役立つと考えています。例えば、秋田県の能代市で行われている宇宙イベントや、アメリカのネバダ州 Black Rock 砂漠で行われている、ロケットを使って模擬人工衛星を打ち上げて回収するイベント（ARLISS）に参加したりと、いろいろな人と関わる場を提供するように努めています。また、学生の発案で、学園祭で地域の小学生を対象にペットボトルロケットを飛ばす実験教室を開催したりしています。

小学生を対象にする実験教室では、ロケットが飛ぶ仕組みや、ロケットを飛ばす角度を変えると飛ぶ距離が変わることを体験してもらっています。やはり体験したことは印象に残ると思うのです。高

豊かな暮らしの実現に
制御工学と力学で挑戦



高橋正樹 Masaki Takahashi

専門は制御工学、知的制御工学。モデルベース制御をベースに、機械・力学制御、知能ロボティクス、宇宙工学分野での研究に取り組む。2004年、慶應義塾大学理工学研究科にて博士（工学）を取得。2004年に慶應義塾大学特別研究助手、2005年に慶應義塾大学理工学部助手、2007年に助教を経て、2009年より専任講師、現在に至る。

校で物理を学ぶとき、「あのときにロケットが飛んだのはこういう理屈だからか」とつながってくれば、その先に興味を持つ原動力になるはず。そして研究室の学生には、教えることの難しさを感じてもらえとうれしいです。

——先生自身が人との出会いの中で記憶に残っていることはありますか？

イタリアの大学にロボットで有名な研究者がいらっしゃるのですが、その方と話したことです。その先生は、私の専門が制御工学であることを知ると、自分の専門は情報工学で制御工学のことが分からないから君と話をしたいと、博士を取ったばかりの私に言ってきたのです。先生の姿勢は非常に話しやすく、有益な情報交換の場になりました。

自分の専門分野を極めると、当然分か

らない領域は出てきますし、そのことを必要以上に恥じる必要はないこと、自分の専門的な視点を持つことが大切であることを実感しました。学生にもこのことはきちんと伝えていきたいです。

◎ちょっと一言◎

●学生さんから：僕ら学生のがんばりを辛抱強く見守ってくれつつ、必要な時にはそれとなく的確なアドバイスをしてくれる頼れる先生です。しかもバイトや就活などへの理解もあるなど、バランス感覚も絶妙です。

（取材・構成 渡辺 馨）

さらに詳しい内容は
<http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai>

高橋研究室の1年

研究に、課外活動に、
スポーツに…盛りだくさんの
楽しい1年です！



4
月

新歓（新入生歓迎）合宿が終わると、制御や学術論文の輪講が始まります。新入生交流イベントなどの気分転換を交えながら、研究活動は徐々に本格化していきます。



5
月

理工学部ソフトボール大会に出場。2010年は敗者復活戦の決勝リーグまで進みました。試合後はフットサルで汗を流し、新たな気持ちで研究を行っています。



6
月

高校生を対象とした理工学部説明会など、研究成果の広報活動を積極的に行っています。高校時代に説明会に参加して私たちの研究室に興味を持ち、入ってきた学生もいます。



7
月

海外（イタリア、アメリカ、スペイン）からの留学生を積極的に受け入れています。留学生との交流を通じて、他国の文化を肌で感じ、語学力も磨いています。



8
月

夏合宿では、研究成果報告会だけでなく、OBとの交流や企業見学などを通して、有意義な体験をしています。



9
月

研究課外活動の一環として、小型自律制御機を開発し、8月の能代宇宙イベントや9月に米国ネバダ州ブラックロック砂漠で開かれる ARLISS に参加しています（5ページ参照）。



10
月

理工学部の学園祭（矢上祭）では、水ロケット教室を開催し、近隣の小学生を対象に学生による宇宙教育ボランティア活動を行っています。



11
月

7月頃から開催されている制御、ロボット、宇宙に関連した多数の学会に国内外を問わず参加し、日頃の研究成果を発表しています。



12
月

研究成果の取りまとめに向けて、研究活動が本格化してきます。卒論・修論を前にスキーやスノーボードでリフレッシュしています。



1
月

修士1年生が中心になって、卒論・修論に向けて激励会（炊き出し）を開催します。研究室の年中行事の1つです。



2
月

1年間の研究活動の成果を卒論・修論としてまとめ、報告します。最後の打ち上げでは、研究室を卒業する学生から後輩たちに、熱いメッセージが送られます。



3
月

卒業式、学位授与式。修士や博士に進学する学生、企業に就職する学生、各々が希望を持って新しい環境へと巣立っていきます。

私の 本棚

My favorite books



● Probabilistic Robotics

ロボットが入る生活に近い環境で動くとき、環境やシステムに存在する不確実さや予測が難しい事象への対処が必要になります。その実現の1つのアプローチとして、確率的なアプローチによる設計法があります。この本では、数学的背景や確率ロボティクスの主要なアルゴリズムが実装例や実験結果を示しながら解説されています。翻訳書として『確率ロボティクス』もあります。病院内で荷物を搬送するロボット MKR-003 が、人間の存在する環境で安全に移動するための行動アルゴリズムを開発する際に見つけた1冊です。

● ものづくり敗戦 受験生や大学生に

読んでほしい1冊です。制御理論の大家である木村英紀先生著。日本の科学技術の発展について歴史をたどって解説し、現状の本質的問題について論破しています。ますますグローバル競争が激しくなるなか、今、何を学ぶべきかを考えるきっかけにしてくれると思います。多くの情報が比較的簡単に入手できる時代だからこそ、本質を見極める能力を身につける訓練を日々続けてほしいと思います。

● Introduction to Dynamics and Control 助手に

なったとき、指導教員である吉田和夫先生から紹介していただいた力学、振動工学、制御理論の基礎に関する教科書です。吉田先生が「力学の教科書にはいくつかの流儀があり、この参考書が自分の流儀に合っている」と言っていたことを思い出します。今、学科の力学の講義を担当するようになり、教える内容や順番について毎年考えさせられることが多く、その言葉の意味を実感しています。

● バトリシア・コーンウェル「検屍官シリーズ」

ミステリー小説シリーズです。法科学が大きな役割を果たし、最新の科学捜査を導入して事件を解決へと導いていきます。主要人物の設定が詳細に書かれ、作品を追って各々の人生も進展していくので、ぜひ初刊から読んでみてください。昔は証拠になると思われていなかったものが事件解決の糸口になるなど、最新の科学捜査が興味深く読んでいます。

● Space Vehicle Dynamics and Control

宇宙機の力学と制御に関する学術書です。動的システムのモデリング・アナリシスと制御、軌道力学と制御、姿勢の力学と制御、構造力学と制御、先進的宇宙機の力学と制御の5部構成で、基礎から応用まで幅広く網羅した内容になっています。数多くの数値解析例や文献が示されているため、宇宙機の力学と制御について深く専門的に学べる1冊です。

● 遠い空の向こうに (October Sky) [DVD]

元NASA技術者ホームー・H・ヒッカム氏の実話に基づいた作品です。1957年、ソ連が打ち上げた人類初の人工衛星スプートニクを見た大きな衝撃から、

高校生のホームーはロケット作りに挑戦。クラスメートとの友情、厳格な父との確執と和解、教師や母親など温かく支える人々との出会いなど、さまざまな経験を通じてホームーが成長していく過程を描いています。私自身の大きな転換期にも、支え、理解してくれた人との出会いがあったことを思い出させてくれます。あまりに感動して3回も映画館に見に行った、思い出の1本です。

「制御」のはじまり

高橋専任講師の研究テーマは、「モデルベース制御」です。「制御」とは「機械や装置、設備が目的に合った動作をするように調節すること」です。制御の歴史は古いのですが、私たちが考えているような制御という概念で正確に説明できるようなものが生まれたのは 1788 年のことです。

ジェームス・ワットは、人間がはじめて作り出した原動機の「蒸気機関」を 1776 年に発明し、「産業革命の父」とも呼ばれています。原動機は機械にエネルギーを供給するものですが、「必要なときに必要なだけ」エネルギーを供給するものでなければ、機械は目的通りに動作しません。ワットは、蒸気機関の出力を一定にするために「ガバナ」という調速器

を考案して、蒸気機関に蒸気を送るパイプのバルブのところに取り付けました。この「ガバナ」の開発で、蒸気機関は急速に普及したのです。

このガバナの開発により、あまり知られていませんがワットは「制御工学の生みの親」と呼ばれています。

19 世紀の半ば、ケンブリッジ大学の G.B. エアリーは、天体観測用の望遠鏡の回転精度を維持するために「ガバナ」の動作原理である「遠心ガバナ」を用いました。そこで、遠心ガバナの不安定運動を見つけ、その理論的な解析を行いました。この解析は、フィードバック制御の研究のスタートともいわれています。

その後、電磁気学の研究などで有名な J.C. マクスウェルが『ガバナについて』という論文を 1868 年に書き、ガバナの安定性を論じました。彼はたくさんのガバ

ナ（調速器）に共通する特徴を調べ、その普遍的な性質を定量的に記述しました。これはガバナの「モデル」を作って解析したことになります。また、安定性という概念を数式で表現しました。こうしたことから、制御の安定性についての最初の体系的な研究はマクスウェルによってなされたといえます。

ワットの「ガバナ」が制御工学を生み出すきっかけになったとすれば、マクスウェルの研究成果は制御理論を生み出すものになったといえるでしょう。

こうして生まれた制御の考え方は、その後、たくさんの研究者によってより洗練されたものとなり、高度な数学を用いるロバスト制御をはじめ、適応制御、非線形制御、ハイブリッド制御などとなって、現在、ロボット工学、宇宙工学、信号・画像処理など最先端の分野で貢献しているのです。

理 工 学 Information

テクニカルショウヨコハマ 2011 (第 32 回工業技術見本市) に 慶應義塾先端科学技術研究センター (KLL) が出展

2011 年 2 月 2 日 (水) ~ 4 日 (金) 10:00 ~ 17:00

パシフィコヨコハマ 展示ホール C・D

<http://www.tech-yokohama.jp/tech2011/>

慶應義塾先端科学技術研究センター (KLL) は、今年もテクニカルショウヨコハマに出展します。KLL の今年のテーマは「次の最先端を拓く…基礎理工学の視点から」。社会や産業を支える基礎科学研究を紹介します。ぜひご来場ください。

第 10 回 KLL 産学連携セミナー 「社会や産業を支える基礎理工学研究」

2011 年 2 月 25 日 (金) 15:00 ~ 18:00

日吉キャンパス協生館 2 階 多目的教室 1

参加費無料・事前申込制

<http://www.kll.keio.ac.jp/>

KLL が主催する産学連携セミナーです。今回は、次世代の社会や産業を支える基礎理工学をテーマに、数理科学や物理などの分野から 4 つの研究を紹介します。セミナー後には懇親・意見交換会を開催予定です。

お申し込みは上記 URL からどうぞ。

編集後記

インタビュー記事 (4 ~ 5 ページ) の写真に登場するロボットについて。名前は「MKR-003」といい、自律移動型の案内・搬送ロボットです。M は村田機械株式会社、K は慶應義塾大学、R はロボット、003 は 3 号目の型という意味です。見た目はとてもかわいいのに、「なぜもっと親しみやすい名前をつけないのですか」と高橋専任講師に聞くと、「病院など、行った先で愛称をつけてもらいやすくなるためです」とのこと。機能性だけでなく、人と関わり合う環境に適応し、愛されるよう、細やかな工夫がなされていることに感心しました。

さて、来年度も魅力的な研究者が控えています。乞うご期待。

(平良沙織)



テクニカルショウヨコハマ 2010 の様子



第 9 回産学連携セミナーの様子

新版 窮理図解

No.06 2011 January

編集	新版窮理図解編集委員会
写真	邑口京一郎
イラスト	中村知史
デザイン	八十島博明 (GRID)
編集協力	サイテック・コミュニケーションズ
発行者	青山藤詞郎
発行	慶應義塾大学理工学部
	〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
web 版	http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai