人工物設計・生産研究連絡委員会

メカトロニクス専門委員会報告

# 心豊かな社会実現のための次世代メカトロニクスの提言

## －技術ウィービングによる個人コンテンツの創成－

平成１５年6月２４日

日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会

メカトロニクス専門委員会

この報告は、第１８期日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会メカトロニクス専門委員会、人間・知能・環境技術ウィービング小委員会及びナノ・バイオ技術ウィービング小委員会での審議結果をメカトロニクス専門委員会において取りまとめ発表するものである。

[メカトロニクス専門委員会]

| | | |
|---|---|---|
| 委員長 | 板生　　清 | （東京大学大学院新領域創成科学研究科　教授） |
| 委　員 | 佐藤　知正 | （東京大学大学院情報理工学系研究科　教授） |
| | 高瀬　國克 | （電気通信大学大学院情報システム学研究科　教授） |
| | 原島　文雄 | （東京電機大学工学部　教授） |
| | 福田　敏男 | （名古屋大学大学院工学研究科　教授） |
| | 藤井　隆雄 | （大阪大学大学院基礎工学研究科　教授） |

[人間・知能・環境技術ウィービング小委員会]

| | | |
|---|---|---|
| 委員長 | 佐藤　知正 | （東京大学大学院情報理工学系研究科　教授） |
| 幹　事 | 保坂　　寛 | （東京大学大学院新領域創成科学研究科　教授） |
| 委　員 | 大久保俊文 | （東洋大学工学部　教授） |
| | 大隅　　久 | （中央大学理工学部　教授） |
| | 小倉　　武 | （ＮＴＴ㈱マイクロシステムインテグレーション研究所　部長） |
| | 川村　貞夫 | （立命館大学大学院理工学研究科　教授） |
| | 菅野　重樹 | （早稲田大学理工学部　教授） |
| | 高石　　哲 | （㈱ＮＴＴデータイメージソリューションビジネスユニット長） |
| | 高瀬　國克 | （電気通信大学大学院情報システム学研究科　教授） |
| | 長崎　晋也 | （東京大学大学院新領域創成科学研究科　助教授） |
| | 沼澤　成男 | （㈱デンソー第１開発部　室長） |
| | 橋本　政昭 | （橋本総業㈱　社長） |
| | 平井　成興 | （産業技術総合研究所知能システム研究部門　副分野長） |
| | 森　　武俊 | （東京大学大学院情報学環・学際情報学府　助教授） |
| | 山田　一郎 | （東京大学大学院工学系研究科　教授） |
| | 山田　陽滋 | （豊田工業大学機械システム分野　助教授） |

[ナノ・バイオ技術ウィービング小委員会]

| | | |
|---|---|---|
| 委員長 | 福田　敏男 | （名古屋大学大学院工学研究科　教授） |
| 委　員 | 新井　健生 | （大阪大学大学院基礎工学研究科　教授） |
| | 新井　史人 | （名古屋大学大学院工学研究科　助教授） |
| | 石島　秋彦 | （名古屋大学大学院工学研究科　助教授） |
| | 北森　武彦 | （東京大学大学院工学系研究科　教授） |
| | 齋藤　弥八 | （三重大学工学部電気電子工学科　教授） |
| | 杉山　　進 | （立命館大学理工学部　教授） |

谷川　民生（産業技術総合研究所知能システム研究部門技能力学研究グループ 研究員）
田畑　　修（立命館大学理工学部　教授）
橋本　秀紀（東京大学生産技術研究所　助教授）
樋口　俊郎（東京大学大学院工学系研究科　教授）
宝谷　紘一（名古屋大学大学院理学研究科　教授）
馬場　嘉信（徳島大学大学院薬学研究科　教授）
吉川　研一（京都大学大学院理学研究科　教授）
鷲津　正夫（東京大学大学院工学系研究科　教授）

# 要旨

## （１）検討の経緯

前期（１７期）で作成した「メカトロニクス教育・研究に関する提言」を基に、日本発メカトロニクスのコンセプトをさらに深化・発展させるための広範囲に至る議論を行ってきた。そもそもメカトロニクスとは初期の段階では電子・情報・機械の諸技術を融合した、従来にない高機能な製品・製造技術の総称であった。これを基に前期では発展形態としてマイクロマシン技術・光技術を加えた最新技術を駆使して、コンピュータワールドと現実のリアルワールドを結ぶ技術と再定義し、教育と研究の充実を提言した。これを受けて今期では、さらに基本に立帰るため、２つの小委員会「ナノ・バイオ技術ウィービング小委員会」「人間・知能・環境技術ウィービング小委員会」を設けて検討した。前者の目的はメカトロニクスを構成する基本要素をさらに詳細に論ずるうえで、ナノ・バイオまで深化させること。後者の目的はリアルワールドとコンピュータワールドのリンクとしての役割を担うメカトロニクスの応用面への拡大を検証することである。

以上の小委員会の活動の中間報告を踏まえながら本専門委員会ではウィービングという概念を創り出した。

この報告は第１８期日本学術会議人工物設計・生産研究連絡委員会メカトロニクス専門委員会の審議結果を取りまとめ発表するものである。

## （２）現状と課題

２１世紀の日本は少子高齢化、環境劣化、個人の埋没、心の荒廃等という大きな社会問題に直面する課題先進国といえる。この課題を克服することが２１世紀の日本を再度世界に蘇らせるうえで最も大事なことである。この実現のためには精神論だけでは不可能で、ツールとしての科学技術の動員が不可欠であることは論をまたない。

２０世紀において日本は「産業技術」育成のために国力を投入して大きな成功を収めてきてつい最近までその余韻に酔いしれてきたといえる。この「産業技術」は機械と電子・情報・物理・化学など技術を融合したメカトロニクス技術に負うところが大であり、自動車、家電、携帯機器、電子部品など、日本の花形産業を創成してきた。

しかし、２１世紀の課題は社会のニーズを科学技術によって解決するための「社会技術」とも言うべき技術を必要としている。ここに必要とされる社会技術は多次元の非線形方程式を、まず編み出し、それを摂動法のような手段で解き、近似解を求めるようなものである。これは目的明解な問題を解くような従来のメカトロニクスでは対応不可能である。このためには現実のリアルワールドとコンピュータワールドをリンクする新しい「技術ウィービング」のような手法の導入が不可欠である。

またインターネットの普及はソサエティの構造そのものを変えつつある。今までのヒエラルキー社会が徐々にネットワーク社会へと移りつつある。これは、個の時代の到来を意味し、インターネット自体が大きなライブラリーを構成し、従来の知の殿堂としての大学や巨大教育機関のあり方が問いだされることになってきた。

技術ウィービングの概念は、まさにインターネットになぞえられる。ナノ・バイオ技術に到る多くの縦糸と人間・知能・環境技術に広がる多くの横糸の織りなす「社会技術」の概念である。これは、

技術融合のようにひとつひとつの技術が融け合うことと異なり、ひとつひとつがしっかりと他の技術と絡み合いつつ独特の色を出す。すなわち、個が失われることなく新しい技術を生み出すというものである。

これには、個性をもった個人の情報（個人コンテンツ）をメカトロニクスシステムに（生物の機能・原理を）導入する新たな試みが必要であって、今後、国際的競争力を維持していく上でもナノ・バイオシステム創成のための基盤技術とメカトロニクスとの融合化のための方法論をベースにして取り組んでいく必要がある。

総合科学技術会議において重点項目として挙げられている環境・ナノ・バイオ・情報という個別分野に加えて総合技術分野としての「技術ウィービング」分野をさらに、重点分野として加えることが重要である。

## （３）提言

【１】メカトロニクスの概念および技術は、日本から発信され、２５年間日本の先端技術を支え続けてきたものであるが、２１世紀の新たな諸問題に対処するために従来の機械・電子・情報と言う工学技術研究をナノ・バイオという科学技術領域まで深めるとともに、応用においては人間・自然・環境の領域を広げて、これらの織り成す技術ウィービングという概念を導入して、より新しい展開を目指すことを提言する。

【２】技術ウィービングを具体化する研究プロジェクトとして、人との関係を知能化した機械（知能メカトロニクス）がネットワークで結ばれ個人コンテンツをもちそれに基づいて、ある時は単体で、ある時は複数のシステムや要素が協調して、必要とされるときに人の機能を補強（Augment）し、その人が求める支援（Service）を実施するユビキタスメカトロニクスシステムの実現を提言する。

【３】このような世界を実現するための組織形態は、一極集中や強固な中央組織ではなく、社会のニーズをもつ人、技術者、公務員などいろいろな立場の人々が、自由に参加できるＮＰＯのような、フレキシブルな対応が可能なシステムである。こうした組織がニーズからシーズまでの幅広い対応による技術フローを喚起し、新しいサービスを創造していく――そんな技術の湧き出すノードのような役割をもつ技術ウィービング・コアとしての研究開発型ＮＰＯの設立と、これらを積極的に支援する組織の設立を提言する。

# 目　次


１．はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　１

２．メカトロニクス技術の過去・現在から将来の方向　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　２

　２－１　メカトロニクスの発展

　２－２　マイクロメカトロニクスの展開

　２－３　ナノ・バイオ基盤技術構築に向けた方向性

３．メカトロニクスの人間・社会・環境分野への展開　――ユビキタスメカトロニクス――・　４

　３－１　はじめに

　３－２　ハードメカトロから個人コンテンツ創成のためのソフトメカトロへ

４．ユビキタスメカトロニクスの将来イメージと技術課題　・・・・・・・・・・・・・・・・・　６

　４－１　環境情報システムの研究開発

　４－２　環境ロボットシステムの研究開発

５．メカトロニクス技術の深化　――ナノ・バイオシステム――　・・・・・・・・・・・・・１２

　５－１　ナノ・バイオシステム創製のための基盤技術

　５－２　ナノ・バイオシステムの応用

６．「技術ウィービング」の提言　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４

# １．はじめに

自然科学における重要な発見は、２０世紀の初頭から１９６０年代までに集中しているが、技術革新においては２０世紀後半のここ５０年間に集中している。なかでも、世界に冠たる日本の産業として認知された時計、カメラなどの精密機械、自動車、造船、半導体、家電、情報機器などの諸産業は、後半の２５年、すなわち７５年から現在に至るまでに飛躍的発展を遂げたメカトロニクス技術なくしては語れないといってもいい過ぎではないだろう。

ここでは２１世紀のメカトロニクスを占いたいと思う。結論から先に述べると、２１世紀のメカトロニクスは「技術ウィービング（weaving：織ること）」へと脱皮することを予言する。すなわち、メカトロニクスは、コンピュータや通信、バイオテクノロジー、エネルギー、新素材、脳科学といった、ありとあらゆる科学技術と、動植物や人間、環境などを、あたかも縦糸と横糸によって紡がれた一枚のウェッブ（織物）のように有機的に結びつける可能性を秘めた優れた技術である。

# ２．メカトロニクス技術の過去・現在から将来の方向

## ２－１　メカトロニクスの発展

機械の制御技術の源流は、１８世紀末にジェームズ・ワットが発明した調速機にあると言われている。やがて、２０世紀初めから、自動車、航空機、船舶が発達し始め、５７年には人工衛星が打ち上げられた。さらに、ＭＩＴのハリソンによって電気制御による高精度な回折格子線機（ルーリングエンジン）が開発され、数値制御工作機械の基礎研究が始まる。こうしてメカトロニクスの萌芽の兆しが見え始めた。

それから十数年でメカトロニクスは飛躍的な発展を遂げた。マイクロプロセッサの導入によっていよいよ本格的なメカトロニクスの時代がやってきたのが７０年代後半。８０年代も後半になると、半導体分野での微細加工技術の応用によって、マイクロマシンニングの研究がさかんにおこなわれるようになり、各種センサやマイクロアクチュエータの実現の可能性が増してきた。加えて、機械技術の微小化を極限まで追求するマイクロメカニズムの研究も進められるようになる。さらに、９０年代には、光を媒介にして、情報とエネルギーが融合する形態の、いわゆるマイクロメカフォトニクス技術が芽ばえるとともに、マイクロメカトロニクス技術に光技術が加わったマイクロオプトメカトロニクスの時代がやってきた。

そしてここ１０年では、ナノマシンを使ったナノ制御、ナノセンシングが実現するようになり、ナノメカトロニクスとでもいうべき時代へと突入している。近い将来には、メカトロニクスは、ＤＮＡのらせん構造や筋肉のメカニズムなど、生物の精妙なしくみを模擬する技術へと発展していくことであろう。ナノ・バイオメカトロニクスの時代はもうそこまで来ている。

こうして見てくると、日本がどの国よりもいち早く、高水準でオリジナリティの高い製品をつくり出し、経済大国へと発展してきた背景に、メカトロニクスがあることがわかる。今やメカトロニクスは、製品の軽薄短小化や機電一体を表す言葉から脱皮して、科学技術の新思潮を表すものとして世界的にも理解され、認知されつつある。

## ２－２　マイクロメカトロニクスの展開

現代物理学の中核をなす量子力学の進展によって、情報、エレクトロニクス、バイオ、新素材、マイクロマシンなどの先端技術が次々と開花し、時代はますます小さいものを求めるようになっている。このミニチュアリゼーション推進のために必要なのが、「集積回路」「集積機構」「集積情報」である。これらが三位一体となったときに、どのような世界が開けるかを考察する。

たとえば、コンピュータのダウンサウジングとともに、実装技術、ＬＳＩ技術、マイクロマシン技術などの微小化技術が進展することで可能になるのが、ウェアラブルコンピュータである。情報機器はもはや着て歩く時代へと変貌しつつある。あるいは、「時空計」の出現。つまりＧＰＳ、地磁気センサ、傾斜センサ、ジャイロなどの計測手段とＰＨＳなどの通信手段を一体にした空間計に時計と合体させるという発想。これは、ウェアラブルコンピューティングの時代に向けた微小情報機器へ向かう

マイルストーンとなることは間違いない。

生体情報通信システムもその一つである。「着る情報機器」の時代に入ると、人間が身につけている衣服や眼鏡、靴、ベルトを通じてディジタル情報をやり取りすることが考えられる。つまり、人間をネットワークと見立てた分散システムの誕生である。これが実現すれば２４時間の身体の状態監視や長時間の履歴記録、位置情報の常時発信が可能となる。さらに、心臓の動きを見る振動センサを加えると、人間の健康状態を常に把握するヘルスケアシステムが実現できるであろう。

さらに技術が進むと、人間の体がコンピュータに融合する究極のバイオネットワーク時代がやってくる。体内に埋め込んだ血液センサが２４時間血液を検査し、読み取ったデータを高周波信号に変えて体外の受信機に送信することも可能になるであろう。すでに、人間を電線がわりに使う電子データ伝送システムも開発されつつあり、家畜の管理や個人識別に活用される体内埋め込み式の半導体チップの実用化も進んでいる。

こうして見てくると、次々世代の情報機器はウェアラブルから人間・機械一体型のマイクロバイオデバイスの時代を迎えることになると思われる。

## ２－３　ナノ・バイオ基盤技術構築に向けた方向性

これまでのメカトロニクスは機械要素とエレクトロニクスが融合し、さらに光学要素が融合し、これらが集積化・小型化されてきた。またネットワーク化によって大規模情報を取り込み、更にはコンピュータワールドと現実のリアルワールドを結ぶことが可能となった。人工機械に生物の機能・原理を導入することにより、これからの人工機械に質的な変化をもたらすと期待できる。生物には自己修復機能や再生機能といった従来の人工機械にない優れた特性を有している。「ナノ・バイオシステム」が目指すものは、生物を理解し利用することによってナノテクノロジーを発展させることであって、この技術は次世代の人工機械にとって基盤技術となりうる。これまで、「ナノバイオロジー」は生体反応の主役であるタンパク質の内部構造や生体高分子やそれらの相互作用の時間的、空間的な変化を研究対象として発展している。「システムバイオロジー」は生物を１つのシステムとして理解する分野で、生命体が外部刺激に対してどう反応するか、どう状態を変化させるのかを全体システムとして理解し、それを明らかにすることを目指して発展している。人工機械に生物の機能・原理を導入するためには、分子のレベルで物質を操るナノテクノロジー（超微細技術）と、生命の仕組みを分子レベルからシステムレベルにおいて解明していく新しいバイオテクノロジーを組み合わせることを目指した取り組みが必要であると考えられる。日本発のメカトロニクス技術をさらに深化・発展させるためには、生物の機能・原理を導入する新たな試みが必要であって、今後、国際的競争力を維持していく上でもナノ・バイオシステム創製のための基盤技術とメカトロニクスとの融合化のための方法論を国として取り組んでゆく必要がある。

## ３．メカトロニクスの人間・社会・環境分野への展開　－ユビキタスメカトロニクス－

### ３－１　はじめに

これからの社会に必要とされる「社会技術」においては、個性化、多様化、国際化、高齢化への対応が重要なキーテクノロジーとなる。これを可能にするのが半導体技術をその基盤とする情報技術であり、それを加速するのが急速に日常生活に浸透しつつある情報ネットワーク技術、無線通信技術である。社会に存在するさまざまな機械や機械システムを知的ネットワーク化し、多様な人への支援を可能とするユビキタス社会が現実味をもって語られている。

メカトロニクスの概念および技術は日本から発信され、２５年間日本の先端技術を支え続けてきたものであることは、先にも述べた。このように日本はメカトロニクス製品に強い国であり、これまでもビデオや自動車など国政競争力のある身近なメカトロニクス製品を世界に供給してきたし、今後も貿易立国をささえる重要な技術分野であることは論をまたない。このような日本の状況をふまえ将来を考える時、その方向性について、日本経団連から出された「活力と魅力溢れる日本」に再生してゆくために必要な改革提案が示唆に富んだものである。その要点は、(1)連結経営的に日本全体の経済をとらえ、海外投資収益などを日本国内に還流させ、先端的な技術革新に結びつけてゆく「MADE "BY" JAPAN」戦略を進めること、(2)日本の持つ環境技術やビジネスモデルを活かした「環境立国」となること、(3)広い居住空間や質の高い住宅、機能的な都市など、人々の満足度を高める都市・居住環境を整備すること、などを提言している。ここでは環境立国、満足度を高める都市・住居環境が技術的ポイントと指摘されているが、これからのメカトロニクスは、まさにこのような環境や、快適生活への指向性をもった分野へ展開すべきである。つまり、メカトロニクス製品がネットワークによって結合され、総体として知的に人間に優しい環境を形成するユビキタスメカトロニクス分野である。

### ３－２　ハードメカトロから個人コンテンツ創成のためのソフトメカトロへ

ユビキタスメカトロニクス分野を明確にするために、ここでこれまでのメカトロニクス製品をふりかえってみよう。我々は、ビデオや携帯電話･携帯機器や自動車･トラック（情報や物流などの流通分野)、家電や家庭内ロボット（潜在需要分野)、車椅子や電子体温計･電子カルテ（高齢者や病人向け分野）など、さまざまなメカトロ機器にとり囲まれて生活している。しかしながらこれまでのところ、それらは基本的に個別に機能するものとして存在しており、人のために総体として連携してくれる（Plug&Coordinated-Service）機能はなかったし、個性をもつ個人の行動にともなう情報を収集し蓄積することで個人コンテンツとも呼べるデータベースに基づいて、人にあわせてくれる（Personalization）機能も存在しないか貧弱なものであった。これに対し、人との関係を知能化した機械（知能メカトロニクス）がネットワークで結ばれており、ある時は単体で、ある時は複数のシステム要素が協調して、必要とされる時に個人コンテンツに基づいてその人の機能を補強(Augment)し、その人が求める支援(Service)を実施するユビキタスメカトロニクスシステムの実現を考えた。その際、ネットワークや無線通信、タグ技術に支えられた情報通信革命がその実現への有力な実現手段を提供

しつつあることに留意すべきである。さらに、現代社会においては、人は活動するとその情報の足跡を社会のいたるところに残す時代を迎えていることにも留意すべきである。例えば、スーパーマーケットにおいて買い物をすると、いつ、どこで、だれが、何を、いくらで買ったのかの情報がスーパーマーケットのレジに残る。交通手段として高速道路を利用すれば、いつ、どこで、だれが、どこからどこへ移動したのかの記録が高速道路に残される。つまり、人の活動から生じる情報が、社会のあらゆるところに分散して残る時代となっているのである。このように社会に分散した情報を、情報化社会の基本的人権として、個人が収集することができるようになれば、その個人の情報（個人コンテンツ）は、さまざまに利用可能となる。例えば、スーパーマーケット情報が自由に収集できれば、個人の家計簿を自動的に作成することはさほど困難なことではない。この情報は、単に家計簿のみでなく、家庭における物品管理などにも利用可能である。また買い物情報の一部でも、個人の許諾のもと社会に共有することを許せば、地域のＰＯＳシステムができあがる。また、個人の移動情報の記録が、高速道路のみでなくＧＰＳの利用により一般道路にも可能になれば、その人の普段の運転癖をふまえた運転支援も可能になろうし、そのような情報を数多く収集することが許されれば、真に生活に密着した自動車の設計にも生かせる。以上みてきたように、これからのメカトロニクスの新機能を創成するうえで、また、個性をもった個人に適合した新機能をもったメカトロニクス製品を実現するうえで、個人コンテンツの収集と蓄積、利用が重要な役割を果たす。

以上の議論をふまえ、きめ細かで身近なメカトロ製品に強みを有する日本の技術力をさらに強化し新機能製品群によって世界をリードし続けることを可能とするために、個人コンテンツに基づいてパーソナライズ可能なユビキタスメカトロニクス技術、ソフトメカトロニクス技術を確立することが重要であると認識し、早急な研究推進をはかることの重要性が認識できる。

# ４．ユビキタスメカトロニクスの将来イメージと技術課題

ユビキタスメカトロニクス技術の将来イメージとそれを実現するために必要な技術課題を、環境情報収集システムと、環境ロボットシステムを具体的にとりあげて、以下に示す。

## ４－１　環境情報システムの研究開発

### （１）環境情報収集システムの応用イメージ

実際の生活環境において、個人コンテンツとして、環境、人間、人工物の発する情報をデータベース化するシステムを考える。このシステムのキーデバイスは、センサ、無線チップ、電源、プロセッサからなる微小なセンサ端末（ネイチャーインタフェイサ）であり、これらを、人間、自然、人工物に多数装着する。図１にネイチャーインタフェイサの概念図を示す。

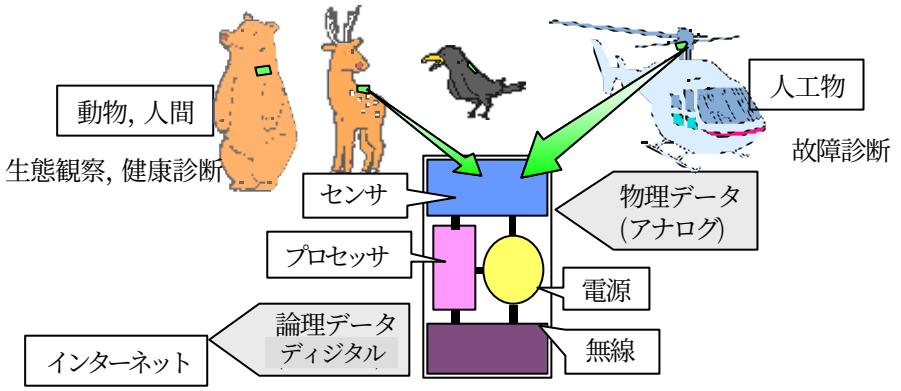


図１　環境計測用センサ端末（ネイチャーインタフェイサ）

このネイチャーインタフェイサからインターネット経由で集約された情報は、統合され各分野の専門家により処理・解析されることで、医療、福祉、人工物設計に利用される。ホルムアルデヒドと脳内血流の関係などは、これまで、実験室内でのみ計測されており、実際の生活環境で各個人がどの程度暴露され、どの程度健康に影響があるかは不明であった。実環境でのデータ収集には、安価で小型なセンサ端末が必須であり、そのプロトタイプを開発することが求められる。具体的にはまず、人間、自然、人工物に対する個別のセンサ端末を開発し、その後、同時計測が可能なシステムに発展させることが求められる。

個人コンテンツの一例としての人間関連データの収集システムは、以下のように構成される。脈、血圧、血流、血中飽和酸素濃度、心電、体温、体動加速度などのセンサと腕時計型コンピュータを人体に装着する。コントローラは簡単な診断機能を持ち、異常があれば警報を医療センターへ発信する。医療センターでは個人のバイタル情報データベースを構築するとともに、医師の診断に基づいて日常生活上のアドバイスを送信する。ターゲットとするマーケットは、日常的な健康管理や病後の継続的

なケアが必要となる心不全、慢性疲労症候群、生活習慣病を持つ患者及び痴呆性高齢者である。図２にヘルスケア用生体データ収集システムの構成例を示す。

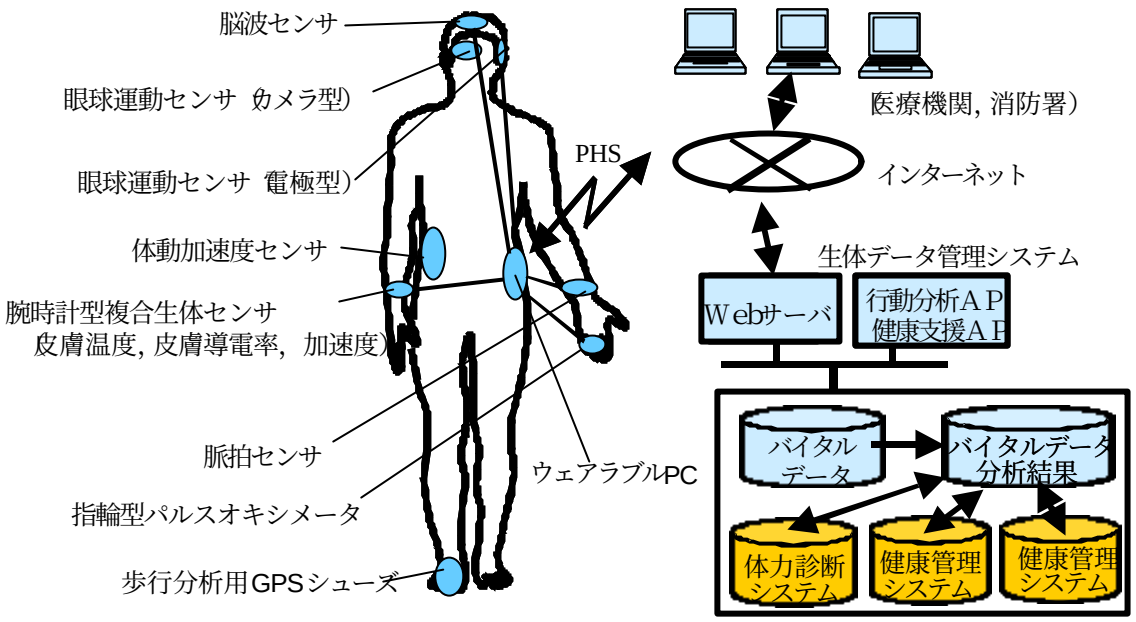


図2　ヘルスケア用生体データ収集システムの構成例

個人をとりまく自然環境データの収集システムは、一例として、以下のように構成される。浮遊粒子状物質（ＳＰＭ）採取用ポンプ、気象センサ、ＧＰＳを携帯情報端末（ＰＤＡ）に内蔵した専用端末を製作する。ＳＰＭは濾紙上に採取して持ち帰り、実験室で分析される。濾紙にはＲＦＩＤが内蔵され、気象データとＧＰＳで計測した採取位置情報が、現場でＲＦＩＤに記録される。ＲＦＩＤのデータは、実験室でＳＰＭ分析時に再生され、測定位置、気象データ、分析結果がデータベース化される。この方式により、大掛かりな化学分析装置を屋外に持ち出すことなく、環境データを収集することが可能となる。ＳＰＭは、ディーゼルエンジンの排ガスなどに含まれ、健康に悪影響があるとされている。風向、風速、温湿度などのデータを用いることにより、ＳＰＭの拡散予測が可能となり、測定点の補間や、それを用いた交通規制などが可能となる。最終的にはその人特有の注意点指摘機能も可能となろう。図３にＲＦＩＤとＰＤＡを用いた環境データ収集システムの構想図を示す。

この技術は、単に人間や環境にとどまらず、さらに広がりをもった人工物に関する情報収集システムにも応用される。人工物に対しては、ニーズの大きい、産業機器の故障診断システムから着手するのがよいと考える。例を挙げれば、旋盤の場合には、バイトに装着可能なサイズで加速度計、微弱無線チップ、電源を一体化し、びびり振動により摩耗を検出する。プロセス制御用のコントロールバルブでは、圧力センサと無線チップをパッキンに内蔵し、パッキンの摩擦を計測し、流体の漏れを予測する。その後、屋内の雰囲気計測などに発展させ、空調機器の制御や最適設計に利用する。 個性をもった個人に適合した作業支援などへの応用も展開されよう。

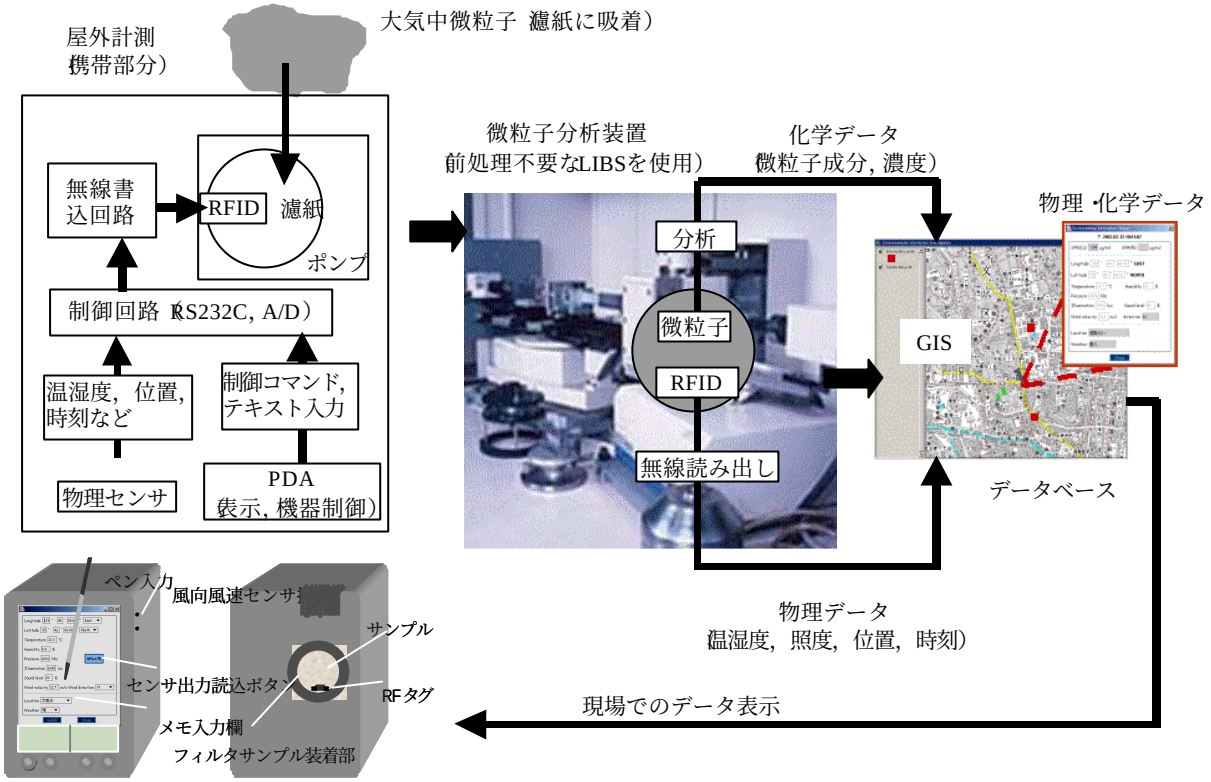


図3　ＲＦＩＤとＰＤＡを用いた環境データ収集システムの構想図

**（２）従来技術の問題点と課題**

**従来の研究としては、人間計測では、フィンランドのＩＳＴ社により、腕時計型のセンサにより脈と体の動きを測り、データを無線で室内に設置した受信機に送り、異常を検出すると公衆回線を通じて医療機関へ通報するシステムが開発されている。また、日本のＭＣメディカル社により、指輪型パルスオキシメータにより脈と血中の飽和酸素濃度を測定し、微弱無線で室内の受信機にデータを送信し、受信機から電話回線により遠隔地のパソコンにデータを送信し、医師が測定値を閲覧するシステムが開発されている。またカナダのアルバータ大学でも類似の研究が行われている。自然環境計測では、ＮＴＴ、中村理科などにより、電子野帳や、温湿度計・照度計などをノートＰＣに接続するシステムが開発されている。人工物計測では、ＡＥセンサなど、各種の故障診断センサが開発されている。**

**これら技術の問題としては以下がある。人間計測では、屋外での計測が可能なシステムがない。またセンサが大掛かりで、日常生活で使うには不便である。自然環境計測では、日常生活で持ち運べるほどに小さいものはなく、化学分析が可能なものもない。人工物計測は産業機器で進んでいるが、その技術が人間計測や自然環境計測に利用されていない。さらに、全体として、多数のセンサデータを自動的に収集し、個人コンテンツとよべるようなデータベースを構築し、必要であれば専門家や研究者が共有するシステムが出来ていない。**

**以上をもとに、個人適合型の環境計測システムを構築するには、以下の課題が考えられる。まず、生体センサ、環境センサおよび電源の一層の小型化が必要である。電源の小型化は限界があるため、**

被測定物の動作状態を自動認識し、不要時にはスリープモードに入るパワーマネジメント技術も必要である。ついでこれらセンサ・電源を、すでにマイクロ化が進展している無線デバイス、プロセッサとの一体化し、独立したモジュールとして機能させることが必要である。また人の操作を容易にするには、入力・表示部は手首装着が望ましいため、上記モジュールとのインタフェイスをもつ腕時計型コントローラも必要である。さらに、通信におけるセキュリティの確保、センサデータフォーマットの標準化もセンサ端末の普及には必要である。そして、多数のセンサ情報を集約するデータベースならびにその上で動作する設計者・医学研究者のためのデータ分析支援システムを開発する。最終的には、自動的に故障診断・健康診断を行うアルゴリズムの開発が目標となる。部品からソフトまで、多数の技術の融合が必要である。

## ４－２　環境ロボットシステムの研究開発

（１）環境ロボットシステムのイメージ

ルームやハウス、社会インフラ自体にメカトロニクス機器から構成されるロボット要素が分散配置されており、システムとしてそれらが、人をいつもみまもっており、必要な時にサービスを提供するユビキタスロボットシステム（環境ロボットシステム）が、ユビキタスメカトロニクスの将来の姿として有望と考えられる。なぜなら、最近の電子タグの技術は、ロボットのセンサ、あるいは作業のための情報源として有効に利用できる可能性が高まってきたこと、また近年のネットワークの技術は、多くのセンサやアクチュエータを協調させて働かせることを容易にしているからである。これらのことを踏まえて、以下では、環境ロボットシステムの具体的な姿（イメージ）を示す。それらは、1)ロボット社会を部屋において構築するイメージ（室内ロボット環境システム）と、2)屋外もふくめ人間社会とインタラクションするイメージ（社会ロボット環境システム）である。

（２）室内ロボット環境システム

ユビキタスメカトロニクスシステムのひとつの姿として、室内ロボット環境システムを描くことができる。これは、ヒューマノイドロボット（実身体型ロボット）や、ＶＲ（Virtual Reality）システム（仮想身体型ロボット）や、ユビキタスアプライアンス（環境型ロボット）や、音声や映像処理エージェント（ソフトウエア型ロボット）などを要素としてもつロボット社会システムであり、それらが、ある時は実身体ロボットとして、ある時は仮想身体ロボットとして、またある時は環境型やソフトウエアロボットとして姿を変えながら、常に人をみまもり、人に語りかけ、人に歩み寄り、人に手を差し伸べるような、統一的な人とのインタラクションを可能とする知的環境システムである。このような研究開発、つまりロボット社会とでもいえるユビキタスメカトロニクス機器群で構成される知的環境を実現するプロジェクトが、文部科学省の２１世紀ＣＯＥの課題として東京大学情報

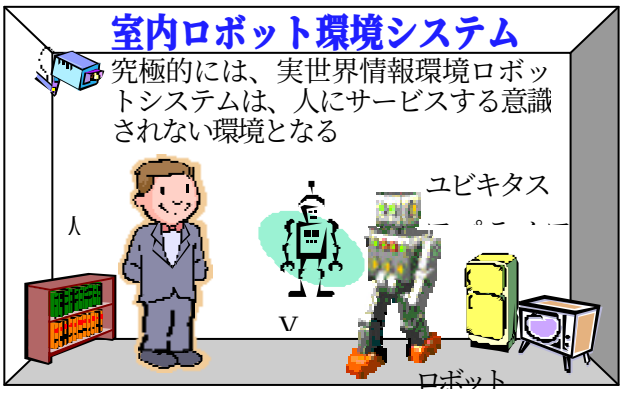


図４　実世界情報環境ロボットシステムのイメージ

理工学系研究科から「実世界情報システムプロジェクト」として提案され、研究が開始されている。図４にその実現イメージを示す。この中では、環境センシングシステムやウェアラブルシステムによる個人情報収集蓄積、そしてそれに基づいた個性をもつ人間との新しいインタラクションが重要な研究課題として取り上げられている。このような技術は、健康な老人生活を可能とする技術、家庭における安全で安心な生活を可能とする技術、また、医療福祉支援技術として、その社会的要請と期待が大きい。

（３）社会ロボット環境システム

これは、先に述べた室内ロボット環境システムを、人間社会へ適用することを追求したイメージである(図５)。現在我々は、さまざまな行動センサに囲まれて生活している。例えば、携帯電話や、スーパーのポイントカード、駅で使う定期券などがその例である。病院では、さまざまな病気にかかわる情報が収集され、会社では仕事にかかわる膨大な情報が発生する。我々は活動することで、その活動結果を、自分自身の携帯電話や、スーパーや駅に、病院や会社など、社会のいたるところに残しているのである。それらの情報を統合できれば、我々の活動記録ができあがり、それはさまざまな応用を可能とする。例えば、買い物をした全てのスーパーマーケットをふくむ店から、情報時代の個人の基本的人権としてその情報を集めることができれば、帰宅した時点で家計簿ができている（自動家計簿機能)。また、その情報の一部を、その人が利用する地域の店に対して利用することを許し、このような情報の流通が幅広く実現できれば、いわば地域のＰＯＳシステムとでもいえるシステムを構築することができ、その店にとって必要とされる品物の地域をふまえた的確な手配が可能となる。また、電子タグと結びつくことによって、その品物のお店への補給や接客をロボットによって実施することも可能となろう（ロボットによる物流や商品展示サービス、接客サービス)。これはロボティック都市環境へと広がりをもつものである。個人コンテンツをこのように蓄え、それを有効に利用するメカトロニクス製品を、ぜひ日本で世界にさきがけて実現したいものである。これを可能とする技術が、今後、世界に冠たる日本のメカトロニクス製品をさらに強くし、世界をリードしつづけるコア技術になると考えている。

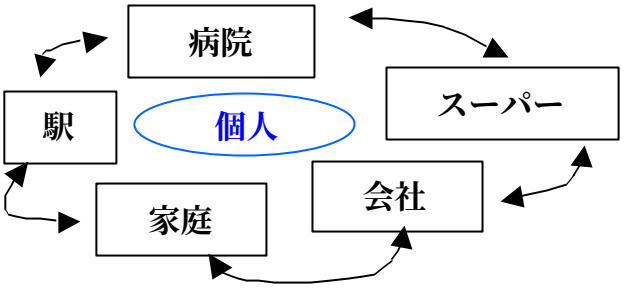

図5　社会ロボット環境システム

（４）環境ロボットシステム実現のための技術課題

環境ロボットシステム実現のために求められる研究開発課題は、環境側の研究開発項目と人間側の研究開発項目に大別される。以下にその項目を整理する。

●環境側研究開発＝個性をもつ人間へのサービス環境実現技術：

・環境や機械のセンサ・アクチュエータ化技術

知能メカトロニクスや知能メカトロニクス環境実現のために、環境にセンサやアクチュエータを分散配置することを可能にする技術で、新しいセンサやアクチュエータの開発、それらを環境に埋め込む技術の開発などが含まれる。

・ユビキタスメカトロニクスネットワーク技術

**これは、知能機械のプラグ＆協調プレイ実現のための技術で、センサとアクチュエータを結合するネットワークプロトコル、機能のレベルで統一的にセンサとアクチュエータを結合可能とする技術、機能的に結合するばかりでなくそれらを協調させて働かせることを可能にする技術である。**

**・メカトロニクスサービスコンテンツ技術**

**さまざまなメカトロニクス機器の多様なサービスを統一的に実現するための技術で、サービス内容を記述する技術、それを蓄積しておきネットワークを介して検索し、ダウンロードして働かせる技術などが含まれる。**

**●人間側研究開発＝ロボットパーソナライゼーション技術：**

**・自然な人間活動の計測・解明および個人コンテンツ構築技術**

**ウェアラブルや環境センサ群によって人間や人間活動を計測いたり、それから発生する情報をと集積し、コンテンツとして構築する技術。**

**・個人適合支援技術**

**これは、個人コンテンツに基づいてメカトロニクスサービス機能を、その個人に適合させる技術。個人コンテンツ統合利用のための知能技術である。**

# ５．メカトロニクス技術の深化　――　ナノ・バイオシステム――

## ５－１　ナノ・バイオシステム創製のための基盤技術

人工物である機械とバイオシステムとのサイズが構成要素レベルで接近し、今後はこれらの融合をナノ寸法レベルで行い、両者の利点を活かした複合システムの構築が望まれる。これにより、従来の人工機械システムを超越したまったく新しいシステムの実現が期待できる。このためには、これまでの微細加工技術をさらに発展させ、ナノ寸法レベルで設計された機能デバイスから構成されるナノマシンを創製するための技術や、バイオシステムをより詳細に調べるために、ナノ寸法レベルで低侵襲または非侵襲に解剖・解析・調査・改造するための技術や、生物と人工機械をナノレベルで物理的・化学的・電気的に連続的に結合する技術が必要となると考えられる。これらの基盤技術をもとに、ナノ・バイオシステム創製のための基盤技術を以下にまとめる。

（１）ナノマシン創製基盤技術
ナノ寸法レベルで設計された機能デバイスから構成されるナノマシンを創製するための技術。
（２）ナノ・バイオラボラトリ
生物をナノ寸法レベルで低侵襲または非侵襲に解剖・解析・調査・改造するための技術。
（３）生物・機械用ナノ・バイオインタフェイス
生物と人工機械をナノレベルで物理的・化学的・電気的に連続的に結合する技術。

生体の”構成要素”である生体（高）分子自体のサイズはナノメートルスケールであるため、ナノ寸法レベルの分子構造・機能解析およびデバイス設計が重要であることは間違いない。しかし、生体機能は分子１個で発現されるのでも、あるいは単にそれらの単純な集合体で発現されるのでもなく、種々の構成要素が多数組み合わさった”システム”レベルで初めて発現されるということに注意すべきである。そして”システム”のスケールは、「細胞」に代表される様に、一般にマイクロメートルオーダーに及ぶことを充分考慮することが重要である。従って、（１）ナノマシン創製基盤技術においては、ナノ寸法レベルで設計されたデバイスの”生体機能”を発現させる”場”の創製を同時に行うことを提案する。この考え方は（２）ナノ・バイオラボラトリにおいては、常にシステムレベル（マイクロメートルスケール）に与える影響を考慮しながら技術創製するということにつながり、（３）生物・機械用ナノ・バイオインタフェイスでは、機能発現を意識したナノレベル結合技術の創製につながる。”場”の一つの具体例として、京都大学の吉川らの研究がある。これは細胞サイズ（マイクロメートルオーダー）のリポソームを創製し、そこにナノ寸法の生体分子（反応系）を導入することによって、様々な生体機能を実現しようとするものである。細胞サイズリポソーム内への長鎖ＤＮＡの導入、細胞サイズリポソーム内での転写・発現に成功している。また、本研究グループで見出されてきた、長鎖ＤＮＡ高次構造の単分子折り畳み転移の機構を利用して、転写反応のＯＮ／ＯＦＦスイッチ制御を、転写関連タンパク非存在下で人工的に行うことにも成功している。

メカトロニクス技術に生物の機能・原理を導入する新たな試みを行うには、この他に多くの既存基盤技術をベースに、目的を絞ってウィービング戦略を立てていく必要がある。

## ５－２　ナノ・バイオシステムの応用

「ナノ・バイオテクノロジー」は、ナノレベルの解析技術を用いて、生命現象を解明し、その成果を医薬品、計測、物質生産などへ応用する基礎生物学と先端科学技術の新たな融合分野であって、「生体システムを、ナノ・マイクロデバイスの作成技術とツールを用いて解明するとともに、より高度なナノ・マイクロデバイスを製作する新たな方法を生物から学ぶ」こととある。ナノ・バイオテクノロジーはナノテクノロジーとライフサイエンス両分野にまたがる領域であって応用にあっては、以下のような主要研究課題がある。

（１）微細加工技術などのナノテクノロジーをライフサイエンス分野への利用・応用する。
（２）生体物質などをナノデバイス等に利用する。
（３）生体の機能や原理をナノテクノロジーの発展に利用する。

ナノ・バイオテクノロジーの研究分野としては、既存分野への生物原理応用、バイオ・化学センサ、バイオエレクトロニクス、光・バイオシステム、生体ナノマシン、自己組織化による生体分子ナノ構造の構築、ナノ・マイクロチップ技術とその応用などがあげられている。

近年よく聞く「ナノ・バイオシステム」はナノテクノロジーの発展のために「生物を利用する」ことを志向しており、現状では生体物質そのものをデバイスや機能材料として用いる研究（例えば、バイオエレクトロニクス素子）や、生物を理解し応用するために、生物が用いている原理を見出す研究が行われている。将来的には、人工機械にない生物の機能・原理を導入することにより、ナノテクノロジーに質的な変化をもたらすと期待されている。

分子のレベルで物質を操るナノテクノロジー（超微細技術）と、生命の仕組みを解明するバイオテクノロジーを組み合わせることで、様々な応用が期待されている。例えば、医療や環境の中に存在する微量物質の検出や、患者の体調を把握する機能を持つ人工臓器や人工感覚器（人工視覚、人工聴覚）などがある。また、生体の電気化学的反応を素子や部品として生かす研究も有望視されている。生物が体内でエネルギーを作り出したり、わずかな物質を検知したりする場合、ごく弱い電気が流れる。この仕組みを利用し、細胞やたんぱく質などをまるで電子部品のように扱って、機械的に分析や化学合成をするよりも大幅に小さく高機能な装置を作れる可能性がある。基板の上で生化学的反応を再現して毒物の検出などに活用するチップなども開発の焦点である。人工臓器や人工感覚器の開発では、文部科学省が約１００億円を投入する５年計画の大型プロジェクトが２００３年度から始動した。２０１０年には約２兆円の世界市場が見込まれている。アメリカもナノ・バイオ研究の推進を国家戦略上の重点分野と位置づけ、研究開発体制の構築を急いでいる。たんぱく質などナノメートルサイズの生体部品の研究が進み自在に操れるようになれば、医療技術も今とはまったく違ったものになる可能性がある。その他にも多くの応用展開の可能性がある。

## ６.「技術ウィービング」の提言

２１世紀においては、高齢者ケア、医療と福祉、地球環境に寄与できる科学技術が求められているが、これらの諸問題を解決する鍵も、メカトロニクスにある。なぜなら、メカトロニクスは情報通信の世界と実世界（Real World）をリンクする科学技術だからである。コンピュータと人間活動、あるいは機械の各要素との調整を図り、物理的な触れ合いを可能にするのは、メカトロニクス技術をおいて他にない。

しかし、さらにより新しい展開を目指し、２１世紀の諸問題に対処するためには、メカトロニクスに「技術ウィービング」という概念を導入することが必要だと思われる。つまり、従来の機械・電子・情報という工学技術研究をナノ・バイオという領域にまで広げつつ、応用においては、人間や自然・環境までをも扱うという発想によって新たな地平が拓けると考える。

技術ウィービングの概念は、まさにインターネットになぞえられる。ナノ・バイオ技術に到る多くの縦糸と人間・知能・環境技術に広がる多くの横糸の織りなす「社会技術」の概念である。これは、技術融合のようにひとつひとつの技術が融け合うことと異なり、ひとつひとつがしっかりと他の技術と絡み合いつつ独特の色を出す。すなわち、個が失われることなく新しい技術を生み出すというものである。

これには、個性をもった個人の情報（個人コンテンツ）をメカトロニクスシステムに生物の機能・原理を導入する新たな試みが必要であって、今後、国際的競争力を維持していく上でもナノ・バイオシステム創成のための基盤技術とメカトロニクスとの融合化のための方法論をベースにして取り組んでいく必要がある。

総合科学技術会議において重点項目として挙げられている環境・ナノ・バイオ・情報という個別分野に加えて総合技術分野としての「技術ウィービング」分野をさらに、重点分野として加えることが重要である。以上から以下のような「提言」をとりまとめた。

【１】メカトロニクスの概念および技術は、日本から発信され、２５年間日本の先端技術を支え続けてきたものであるが、２１世紀の新たな諸問題に対処するために従来の機械・電子・情報という工学技術研究をナノ・バイオという科学技術領域まで深めるとともに、応用においては人間・自然・環境の領域を広げて、これらの織り成す技術ウィービングという概念を導入して、より新しい展開を目指す必要がある。生物は自己修復機能や再生機能といった従来の人工システムにない優れた特性を有している。生物を理解し、人工システムの設計や構築に生物の機能・原理を導入することにより、これからの人工システムに質的な変化をもたらすと期待できる。したがって、生物の優れた特性を活かした次世代の人工システムを実現することを目指して、人工物である機械とバイオシステムとの融合をナノ寸法レベルで行い、両者の利点を活かした複合ナノ・バイオシステムの構築を行うために必要となる基盤技術の実現を提言する。

【２】技術ウィービングを具体化する研究プロジェクトとして、人との関係を知能化した機械（知能メカトロニクス）がネットワークで結ばれ個人コンテンツをもちそれに基づいて、ある時は単体

で、ある時は複数のシステムや要素が協調して、必要とされるときに人の機能を補強（Augment）し、その人が求める支援（Service）を実施するユビキタスメカトロニクスシステムの実現を提言する。

【3】このような世界を実現するための組織形態は、一極集中や強固な中央組織ではなく、社会のニーズをもつ人、技術者、公務員などいろいろな立場の人々が、自由に参加できるＮＰＯのような、フレキシブルな対応が可能なシステムである。こうした組織がニーズからシーズまでの幅広い対応による技術フローを喚起し、新しいサービスを創造していく――そんな技術の湧き出すノードのような役割をもつ技術ウィービング・コアとしての研究開発型ＮＰＯの設立と、これらを積極的に支援する組織の設立を提言する。