

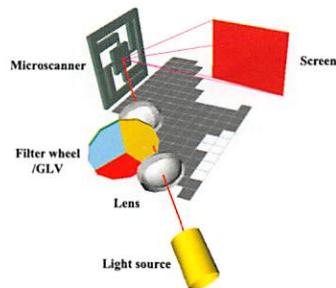
JOURNAL OF THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

Vol.12
No.3
2007

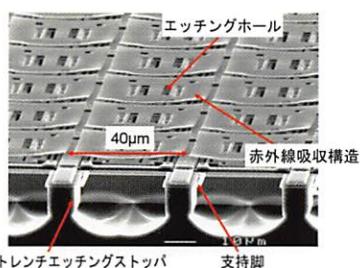
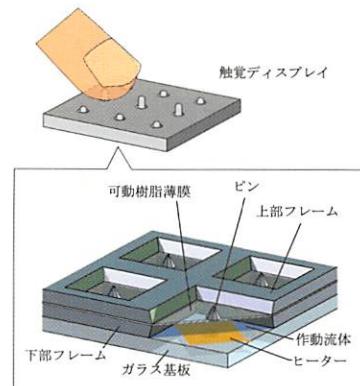
日本バーチャルリアリティ学会誌

特集●VRとMEMS技術

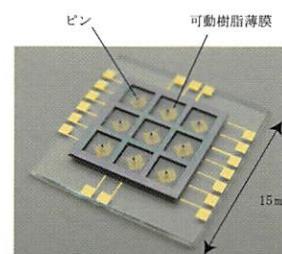
特集●VRとMEMS技術



微小な光スキャナを用いたディスプレイ
(詳細は「MEMSとHI応用への期待」12頁参照)



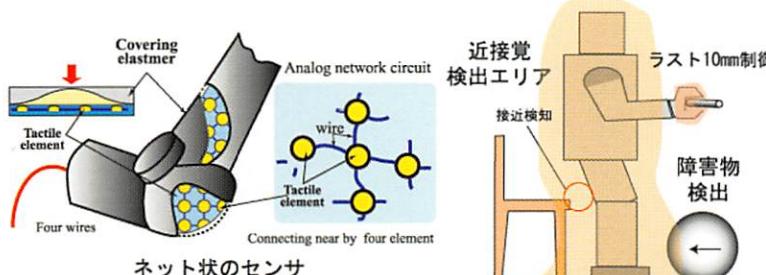
SOIダイオード方式の画素のSEM写真
(詳細は「見えないものを見る」35頁参照)



熱駆動型バブル触覚表示ディスプレイ
(詳細は「MEMSデバイスで感触を与える」38頁参照)

研究室紹介●電気通信大学 電気通信学部 知能氣化器工学科

電気通信学研究科 知能機械工学専攻 下条・明研究室



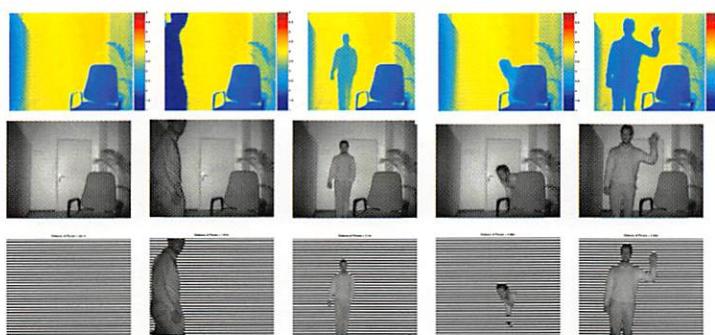
ネット状の構造を持つ近接覚・触覚センサ (詳細は51頁参照)



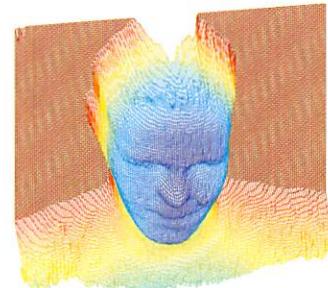
インタラクティブ機能付き触覚ディスプレイ
(詳細は51頁参照)

製品紹介●SwissRanger SR3000

光到達時間計測を用いた奥行き計測カメラ

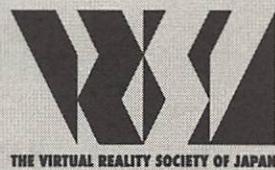


トラッキングの例。第一列：奥行き画像、第二列：グレースケール画像、
第三列：人物のトラッキング (詳細は53頁参照)



3頭部3次元画像取得例
(詳細は53頁参照)

日本バーチャルリアリティ学会誌
Journal of the Virtual Reality Society of Japan
第 12 卷第 3 号



September 2007
Vol.12, No.3

■ CONTENTS

Journal of the Virtual Reality Society of Japan



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

September 2007
Vol.12 No.3

■卷頭言

- 4 ●論文誌雑感
—電子化と英文化について—
横矢直和（奈良先端科学技術大学院大学）

■特集

VRとMEMS技術

- 6 ●ゲストエディタ卷頭言
MEMS：バーチャルを支える小さな巨人
奥山雅則（大阪大学）
野間春生（国際電気通信基礎技術研究所）
- 8 ●MEMSとHI応用への期待
前田龍太郎（産業技術総合研究所）
- 14 ●動きを感じる
前中一介（兵庫県立大学）
- 20 ●形を感じる～超音波マイクロアレイセンサ～
山下 馨，奥山雅則（大阪大学）
- 26 ●ヒトのように触れる
篠田裕之（東京大学）
- 32 ●見えないものを視る
木股雅章（立命館大学）
- 37 ●MEMSデバイスで感触を与える
式田光宏（名古屋大学）

- 会議参加報告
-
- 42 ●ASIAGRAPH Forum 2007
綿貫啓一（埼玉大学）

43 ●第17回「人工現実感研究会」

西村邦裕（東京大学）

43 ●ACE 2007

細井一弘（東京大学）

44 ●Smart Graphics 2007

北岡伸也（大阪大学）

45 ●3次元画像コンファレンス 2007

高橋桂太（東京大学）

46 ●Collab Tech 2007

山下 淳（筑波大学）

47 ●IPT/EGVE 2007

本多健二（東京工業大学）

47 ●HCI International 2007

和田親宗（九州工業大学）

48 ●SIGGRAPH 2007 / Papers

青木孝文（東京工業大学）

49 ●SIGGRAPH 2007 / Emerging Technologies

岩本貴之（東京大学）

■研究室紹介**50 ●電気通信大学 電気通信学部 知能機械工学科**

電気通信学研究科 知能機械工学専攻

下条・明研究室

下条 誠／明 愛國（電気通信大学）

■製品紹介**52 ●SwissRanger SR3000：光到達時間計測を用いた**

奥行き計測カメラ

Thierry Oggier (mesa Imaging AG)

■ラク楽実践 VR -手と足と頭を使え！VRシステムの作り方-**54 ●第14回 小型無線加速度センサの拡張ポートによる**

汎用無線I/O

松本睦樹（筑波大学）

■ワクワク留学体験記**56 ●Mitsubishi Electric Research Laboratories**

橋本悠希（電気通信大学）

■書評**58 ●におい・香りの情報通信**

北崎充晃（豊橋技術科学大学）

59 ■研究会開催についてのお知らせ**61 ■理事会だより****62 ■カレンダー**

(2007年10月以降開催イベント情報)

国内会議／国際会議

■編集後記

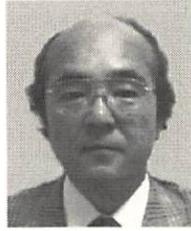
■日本バーチャルリアリティ学会ホームページ

<http://www.vrsj.org/>

●表紙CG作品提供：河口洋一郎（東京大学） ●表紙デザイン：柳沼潔野

巻頭言

論文誌雑感 —電子化と英文化について—



横矢直和

奈良先端科学技術大学院大学

1. はじめに

昨年度から、論文誌担当理事を務めており、今年は廣瀬先生の後を継いで論文委員会の委員長を仰せつかっている。5月に学会事務局から、「理事の方々に順番に巻頭言の執筆をお願いしており、あなたの順番になりました」という執筆依頼を受け、7月の理事会では口頭でだめを押された。締切が近づいてきたので、何を書くかはたと困って過去数年の学会誌をめくってみた。「はたと困った人」はこれまでにも何人かおられたようである。以下は、苦し紛れの論文誌一般に関する雑感である。

これまでにいくつかの学会誌や論文誌の編集に携わる機会があり、現在も某学会の論文誌編集委員長を務めている。解説記事の掲載とカバーする分野に関する幅広い情報提供を目的とする学会誌と原著学術論文の掲載を目的とする論文誌では、その目的が自ずと異なり、読者層も若干異なる。国内の論文誌編集に関わる話題として最近よく出てくるのは、(1)電子出版と冊子体の廃止、(2)英文化の流れである。わがVR学会論文誌はご存知のように、冊子体出版による和文論文誌である。もちろん、英文論文の投稿を受け付けないわけではないが、英文論文が投稿されてくるのはまれであろう。

2. 電子化

本会論文委員会でも完全電子投稿が検討事項に挙がっているが、査読・編集プロセスの効率化と学術情報検索の利便性を考えると、電子出版は時代の趨勢で

あろう。ただ、既に実施した学会もある冊子体論文誌の廃止については賛否両論があるのでないだろうか。筆者は、10年以上前に、勤務する大学の附属図書館の電子図書館化プロジェクトに関わり、現在に至るまでシステム導入にも関与してきた。現在では、日常的に必要とする学術情報の一次情報の多くが電子化されており、外部の出版社等のサイトへのリンクを含めれば、ほとんどの学術情報にPCからアクセスでき、この上なく便利な環境が実現している。最近の研究室の学生には、自分の論文の中で引用している文献が載っている論文誌の冊子体の現物を見たことがないという者もいる。しかし、筆者自身は、会員になっている学会の会誌・論文誌はすべて冊子体で入手し、研究室の書棚に並べて、現物のページをぱらぱらめくるという習慣から抜け出せない。やはり、紙の文化への愛着(執着?)は何ともし難い。お陰で、研究室のスペースが段々と圧迫してきた。電子図書館システムのファイルサーバの容量は毎年増強され、システム全体の処理能力もデータの增加分以上に向上しているので全く問題ないが、研究室のスペースは変わらないため、筆者の1970年代から蓄積してきた非電子図書館は年とともに古い書籍へのアクセスが困難になってきた。「VR学会の理事がなぜ冊子体にこだわるのか、ものの本質は同じだから、バーチャルな電子媒体で十分ではないか」という声が聞こえてきそうである。「いや、そこに載っている情報だけが本質なわけではないので、現在の電子媒体はバーチャルになっていない」と応えることにしよう。

3. 英文化

論文誌英文化は、筆者が編集委員長を務める前述の某学会論文誌でも緊急の検討事項になっている。英文論文誌の出版は分野によっては古くから当たり前で(和文論文誌が存在していることを不思議がされることもある)、本会も含めて筆者が関係する分野が特殊なかも知れない。近年の評価ばかりで、インパクトファクタが話題になることが多いが、これは我が国だけの傾向ではないようである。最近、編集委員を務めている欧米の出版社系論文誌の事務局から、2006年に当該論文誌に対してコンピュータサイエンス分野で最高のインパクトファクタが付いたというメールがあり、2001年に1点台だったインパクトファクタが2006年には6点台になったという驚異的なデータを示すPPTファイルまで添付されていた。我が国における近年の論文誌英文化の流れの根底には、インパクトファクタをとるためということがある。そもそも、この論文誌格付けの基準が妥当か、格付けして何になるかという議論があろうが、日本語が読める研究者は国際的にはマイノリティであることは否定できない。したがって、多くの人に自分の論文を読んでもらうためには、論文を英語で書かざるを得ない。特に、研究者がこれから国際的に活躍するためには、国際会議で発表するだけでなく、若いときから英文ジャーナル論文を書く習慣をつけておく必要がある。

最近では、学会や学術研究助成財団等による若手研究者の英文論文執筆を支援する試みが目立つようになってきた。英文原稿添削経費やジャーナル投稿料・別刷代の支援やそれらの経費相当額を授与する賞の創設などである。これは、国際化の加速と現状に対するある種の危機感を反映しているように思える。かつては、海外で開催される国際会議での発表は、経済的な理由もあって敷居が高く、意識としては英文ジャーナルへの投稿とほとんど変わらなかったような気がする。

筆者自身、学生時代に海外の国際会議に投稿したことではなく、唯一投稿したのは、たまたま京都で開催された第4回パターン認識国際会議であった。最近は、多種多様な国際会議が頻繁に開催されるようになったことと経済的な問題の解消により、修士課程の学生が複数回国際会議で発表することもあり、博士課程修了までに10回近く国際会議をこなす学生も珍しくない。国際会議の敷居は限りなく低くなつたと言えよう。これは、ある意味、喜ばしいことである。ところが一方で、英文ジャーナル論文誌の敷居は年々高くなっている印象を受ける。これは学生に限った話ではなく、研究を生業としているプロの研究者にも当てはまる。先に国際会議の敷居が低くなつたと言つたが、一部の難関会議、筆者が関係する分野だと、例えば、ICCVやSIGGRAPHは逆に、英文ジャーナル論文誌と同様に敷居は高くなる一方である。このような現状が、先の英文論文執筆支援策の背景にある。

4. おわりに

論文誌の電子出版の行き着く先として、個人レベルで簡単に論文誌を発行できるようになるかもしれない。実際、最近では、原稿投稿後1~2週間で出版されるという聞いたことのない電子ジャーナルへの投稿勧誘メールが頻繁に送られてくる。日本語では商売として成り立たないので、この種の電子ジャーナルは当然、英文である。論文誌の電子化+英文化の先には、このような電子ジャーナルの氾濫が待ち構えているのかもしれないが、英文電子ジャーナルによって、冊子体で問題となってきた国内学会論文誌の国際的なセキュレーションの低さを克服できる利点を考えると、学会論文誌の在り様について考えるべきときにきているのではないだろうか。

とりとめもない雑感に終始したが、来年の大会は奈良での開催が予定されているので、最後に、会員の皆様に積極的な参加をお願いしたい。

【略歴】

横矢直和 (YOKOYA Naokazu)

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 教授

1974年大阪大学基礎工学部卒業、1979年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。工学博士。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所(現、産業技術総合研究所)研究員、1986年より1年間カナダ・マギル大学知能機械研究センター客員教授、1993年奈良先端科学技術大学院大学情報科学センター教授(文部省に出向)、1994年より現職。専門は画像処理、コンピュータビジョン、複合現実感など。

特集 ■ VRとMEMS技術

MEMSとHI応用への期待



前田龍太郎 産業技術総合研究所
MAEDA RYUTARO

1. はじめに

MEMSとはMicro electro mechanical systemsの略で半導体製造に用いられる微細加工を用いて、ミクロンサイズの機械素子を製造する手法です。機械を電子回路とミクロンサイズで一括して製造することにより、細胞の操作や微小な光のハンドリング、感度の高いセンサ等の開発が可能となりました。これまでに自動車用の各種のセンサや、プロジェクタ用に用いられる光素子、インクジェットプリンタのヘッド等が実用化され、最近になって更に携帯機器のセンサ類やユビキタス関連のデバイスが市場を賑わせています。

このように次世代の産業として注目を集めているMEMSですが、異分野の研究者が利用するには装置のコスト高と、技術の難易度の高いことが問題で、新しく参入しようとする障壁となっています。また研究者以外の企業の方にとっても、ビジネス化が難しい分野ですが、着実に市場が成長しており、新規の企業さんが参入を考えているのも事実です。本稿がVR関係の研究者や技術者の方々へのHI(ヒューマンインターフェース)を実現する技術としてのMEMSへのアプローチの一助になることを期待します。

MEMS技術ではとかく微小な機械が製作できるという側面が強調されていますが、一括加工によって工業的量産が可能となるという側面も重要です。小さいものを作れば、ヒューマンインターフェースとしては、大変に好都合ですし、更に量産して安価に供給できることは、工業的に大変に意味のあることです。

以下に量産技術とはどんなものかを解説します。またここで必要とされるプロセス技術について簡単に解説します。最後にHIに関連するセンサやアクチュエータの研究開発状況について解説します。

2. 一括量産技術とは - 年賀状との対比

年末の恒例行事に年賀状の作成があります。小学校低学年では出す枚数が多くなく、ほとんど自筆でしょう。小学校も高学年となると、年賀状の枚数も多くなり、版画を利用することが多くなります。ただし表書きは、宛名が様々となることから、自筆とする場合が多いようです。学生から社会人になるにつれ年賀状の枚数が100枚を超えるようになると、印刷業者に依頼するようになります。自筆に要する時間が少なくなり、省力化が図れるのが理由です。ワープロとインクジェットプリンタの出現により、完全に自筆で賀状を書く必要が少くなり、筆不精や悪筆家にとっては理想の時代が到来したと言えましょう。現在ではパーソナルな年賀状は自筆で、ちょっとした知人にはワープロとプリンタで、不特定多数向けの大量の文書は印刷業者に依頼するという役割分担が決まっています。更に手紙では情報のみが重要であるので、紙とインクという物理的媒体も必要でなくなり、電子メールでことを済ませるという時代に至っています。

一方ものづくりの世界は手紙や賀状と異なり、情報のみを媒体に載せるだけではことは済みません。物理的な媒体として様々な材料が必要となり、それを加工するための道具も必要となります。建築では柱に用いる木材、釘等に用いられる金属、かわらに用いられるセラミックスとさまざまな材料が必要となります。電子デバイスではシリコンや電気を伝える金属、樹脂等の絶縁体を使用します。また印刷のような平面的な構造では物足りなく、立体的な構造が必要となる場合も多いのです。

ものづくり技術で道具として思いつくのは、建築では木槌やノミ、カンナです。機械の製作ではドリルや、旋盤、フライス盤が思いつきます。これらを使った加工

法は逐次加工法と呼ばれ、一品生産です。年賀状における自筆にほぼ相当します。逐次加工法は部品を一つずつ加工し、組み立てることによりものづくりを行うため能率が必ずしも高くなく、コストも高くなります。これに対し版画やガリ版印刷に相当する、型を用いた一括加工法と呼ばれる方法があります。型を製作して鉛を流し込んで製品をつくる鋳造法や、プラスチック製品を型で製作する射出成型法、シリコンウェハ上に電子回路パターンを焼き付けるフォトリソグラフィ法等が代表的な例です。型を製作するには手間がかかりますが、いったんできてしまえば、コピーを大量に製造することができ、大きなコストダウンが図れます。一括加工法は上述の印刷を使った年賀状と同様に大量の製品を製造するのに適しています。

3. 微細加工の実際

上述のように、大量生産もののづくりにおける印刷技術類似技術（一括加工法）の重要性は理解されたことと思います。大量に安くものを製作するというほかに、ものづくりの大きなトレンドとしては、微細な加工を行うという方向があります。限られた大きさの中に多くの機能を盛り込むことができるからです。細かい部品がぎっしり詰まった機械ほど複雑なことができるだろうという理屈です。HI であれば細かい部品ほど、人体に無理なく装着でき、また数多くの機能を持たせることが期待されます。

微細な作業として知られているのは例えば、米粒の上に精細な図を名人が描くというようなことが想像されます。人間の手に頼る加工法では 0.1mm 単位の加工が限界に近いと思われます。特殊な道具を使えば、これより小さいものも出来るかもしれません、これはあくまで名人芸であって工学ではありません。小さいものを見るのに、レンズで拡大するのと同様に、小さいものを製作するには光を使った縮小法が有効です。レンズの投影の原理を使って画像を縮小する方法です。この方法によりミクロン単位の加工ができます。レンズを使った拡大であるスライド映写機と類似の原理ですが、拡大でなく縮小である点が異なります。例えば 0.1 ミリの線をスライド上に描いて、100 分の 1 に縮小して投影すれば、1 ミクロンの線が描けるという理屈です。

レンズにより電子回路のパターンを縮小してシリコンウェハ上にパターンを焼き付ける装置はステッパーと呼ばれ、現在半導体製造に利用されています。この方法で微細なパターンを得ようとすると光の解像度に制限されて

いるため、1 ミクロンを切るような細かいパターンを得るには紫外線レーザや極紫外線光源といったより短い波長の光を利用する必要となってきます。そのため装置も大掛かりになり、1 ミクロン以下の構造を、低いコストで製作することは困難となってきます。そこで光より更に高い解像度を期待できる電子線で露光・現像して微細加工を行う手法が考えられます。一般には電子線露光は逐次加工であり、能率が低いので、通常電子線露光はマスター型であるマスクを製造すること以外には用いられないのが普通です。

MEMS を製造するプロセスはマイクロマシニングと呼ばれます。図 1 にバルクマイクロマシニング（左）、サーフェスマイクロマシニング（右）の流れを示します。本章では MEMS 微細加工技術について、図 1 に示したプロセスのうち、ウェハ準備、成膜、フォトリソグラフィ、エッチングについて後段で説明します。バルク、サーフェス双方に共通であるエッチングまでのプロセスについて述べた後、犠牲層形成、除去といったサーフェスマイクロマシニングに特有のプロセスについて述べます。

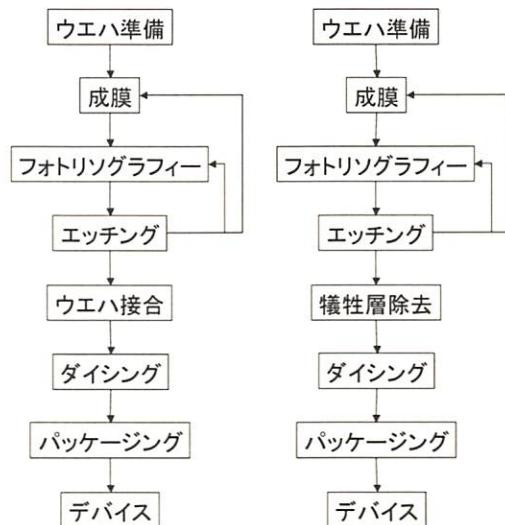


図 1 マイクロマシニングの流れ

基板（ウェハ）の準備

半導体微細加工技術と同様、MEMS 微細加工技術でもシリコンウェハが最も多く用いられます。シリコンウェハは (100), (110), (111) 面のうちいずれかの結晶面が表面になるように切り出し、研磨された形で販売されており、(100) シリコンウェハなどと呼ばれることもあります。これらのうち (100) 面が最もポピュラーで値段も最も安いです。シリコンウェハを水酸化カリウム水溶液

等でウエットエッティングをする場合は、結晶面によってエッティング面の形状が大幅に異なります。このため、どのような形状にエッティングしたいかを念頭においてシリコンウェハを選択する必要があります。

成膜(付着加工)

成膜(付着加工)は、MEMSでは主にシリコンの酸化物、シリコンの窒化物、金属の付着加工が多く用いられます。酸化物は主に酸化炉により、窒化物は化学蒸着法(CVD)により成膜します。酸化物の膜は0.5ミクロンから2ミクロン程度の厚さのものが多用されます。酸素環境中で高温にする手法では厚い膜が得られにくいため、多くの場合水蒸気を含んだ酸素中で酸化を行います。窒化物はアンモニアとシランを高温中で反応させ(CVD法, Chemical Vapor Deposition)成膜を行います。金属は真空蒸着およびスパッタリングにより成膜します。また厳密には成膜法ではありませんが、シリコンウェハに不純物をドーピングする手法(熱拡散、イオン注入)もマイクロマシニングでは使われます。これらの手法について、次に解説します。

熱酸化(シリコン酸化膜の成膜)

シリコン酸化膜は絶縁体、保護膜(passivation layer)、エッティングマスク、ドーピング用のマスクと何らかの「保護」を目的に用いられることが多いのですが、カンチレバーと呼ばれる片持ち梁やブリッジ、ダイヤフラム等の微小構造体の弾性体としての構造材料(図2)、あるいは電気を蓄えるキャパシタとして用いられることもあります。シリコン酸化膜はシリコンウェハの熱酸化、スパッタリング、CVD、スピンドルコートと様々な方法で成膜可能です。熱酸化は通常1000°C以上の高温を必要とするため、他の材料の成膜の後に行なうことは難しいです。また前述のように厚い酸化膜を得るには、乾式でなく水蒸気を含んだ酸素中で酸化を行います。

CVD法

CVD(Chemical Vapor Deposition)法は化学蒸着法と呼ばれ、MEMSでは多結晶シリコン(ポリシリコン)やシリコン窒化膜を成膜することに用いられます。シリコン窒化膜は化学量論的には Si_3N_4 ですが、厳密な組成から外れて用いられることが多いためSiNとも呼ばれます。シリコン酸化膜とほぼ同じ保護膜の目的で用いられますが、最も大きい違いはその内部応力です。シリコンの酸化膜が圧縮応力であるのに比べ、SiNは引っ張り応力を有しています。そのために一般に SiO_2 は片持ち梁構造を製作するのに用いられますが、SiNはダイヤフラムやブリッジとして用いられることが多いです。シリコンリッチの組成にすることで内部応力を限りなく0にすることが可能であり、MEMSに用いるときは応力制御層として導入されることもあります。

SiNの成膜法としてはシランガス(SiH_4)とアンモニアガスを高温で反応させる熱CVD法が用いられます。 SiO_2 もシランガスと N_2O を反応させることにより成膜できます。熱CVD法は1000°C以上の高温を要するため、シリコンウェハ上に低融点の材料が存在する場合には用いることができません。そこでアルミやポリマー上にSiNや SiO_2 を成膜するには熱エネルギーの代わりにプラズマのエネルギーで化学反応を起こさせるプラズマCVD法を用います。プラズマCVDでは熱酸化に比べ、大幅に反応温度を低下させることができ、最新の装置では200°Cを下回るような低温で成膜が行えます。

物理蒸着法

物理蒸着法としては真空蒸着法とスパッタリングが知られており、主に金属膜の成膜に用いられることが多いです。真空蒸着法では基板上に成膜したい金属をヒータで加熱気化させ基板に堆積します。水蒸気が窓ガラスに付着して液滴となるのと同じ現象です。比較的融点の低いAl等を蒸着する場合にはタンゲステンのポートのヒータに通電してジュール加熱により金属を気化させます。融点の高い金属(たとえばCr/AuやTi/Pt)等はタンゲステンヒータの加熱では十分な温度を得られないのと、タンゲステンが不純物として混入することを避けるために電子ビーム溶解により金属を気化させる手法が用いられます(電子ビーム蒸着)。

スパッタリング法では真空中に微量の不活性気体(Ar)を導入し、高電圧を印加してプラズマ化します。プラズマ中のイオン化したArを高電圧で加速して、付着させたい金属(ターゲットと呼ぶ)上に高速で衝突させます。

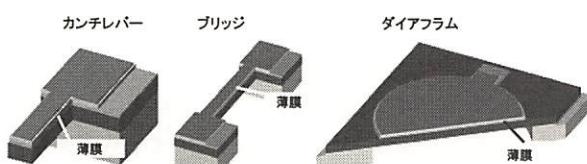


図2 MEMSで多用される弾性体構造

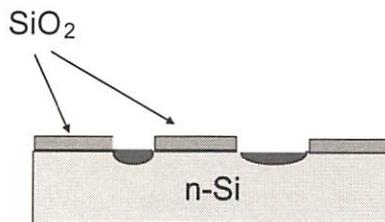
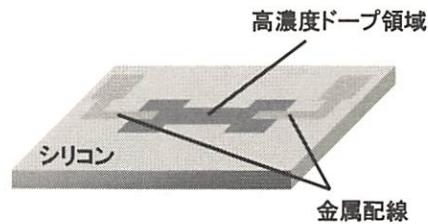
図3 SiO₂膜をマスクとしたn型Si材料への硼素の拡散

図4 高濃度硼素ドープしたピエゾ抵抗素子による半導体圧力センサの原理

アルゴンイオンの衝突によりはじき出されたターゲット金属は微粒子となって基板に高速で衝突します。これにより成膜を行う手法をスパッタリング法と呼びます。真空蒸着に比べて、高速で金属が衝突するため膜の密着性が一般に高いです。また高周波を印加することにより、金属以外のセラミックス(SiO₂やPZT等)を成膜することができます。

ドーピング

シリコンには真性半導体と呼ばれる元来絶縁体と、導体の中間の性質を利用する場合と、微量の不純物を入れた不純物半導体を用いる場合があります。n型であれば燐、p型であれば硼素が不純物として含まれます。そのためn型のなかに硼素をドーピングさせたり、逆にp型に燐をドーピングさせたりしてダイオードを製作することができます。ドーピングする手法には硼素を含んだ物質をシリコン基板に付着させ、熱拡散によりしみこませる手法と、イオン化して高電圧で基板に強制的に注入(イオン注入)する手法が一般的です。またドーピング部位をパターニングするには、シリコン酸化膜をマスク材料として用います(図3)。

マイクロマシニングでは、ドーピングによりダイオードを製作する目的以外にn型のなかに不純物を多く含んだ電気伝導度の高い部分を作り、抵抗体を製作することができます。これら抵抗体は加熱用のヒータとして用いられる一方、応力により抵抗値が変化することを利用した(ピエゾ抵抗型)圧力センサ(図4)の製作にも用いられます。またシリコンに硼素をドーピングさせた層はKOHエッチングには溶けにくいので所望の形状に硼素をドーピングさせ、不要部を除去することで、カンチレバーやダイアフラムのような微小な機械要素を製作するのにも用いられます。

フォトリソグラフィによる微細パターニング

マイクロマシニングにおける微細加工は、フォトリソグラフィと呼ばれる写真印刷技術により行われます。フォトリソグラフィは微細パターンを露光、現像を利用してシリコンウエハ上に一括に転写する手法です。まずガラス板上に微細パターンの形成されたフォトマスクを用います。シリコンウエハ上に塗布したレジストと呼ばれる感光性樹脂に露光によりフォトマスク上の微細パターンを転写します。感光性の樹脂の光の当たった(露光した)ところとマスクに遮られた部分に差が生じ、現像液にどちらかが溶け出しやすくなります。これを用いて、微細パターンを基板上に形成する手法がフォトリソグラフィと呼ばれます。微細パターンを等倍に露光するための装置をマスクアライナと呼び、縮小投影露光を行う装置をステップ露光装置と呼びます。

フォトマスクの微細パターンの形状はCADを用いて設計します。これをフォトマスクメーカーに発注すると、通常は紫外線の透過率の高いガラス上にクロムの薄膜の微細パターンを有したフォトマスクを製作してもらいます。フォトマスクの微細パターンの製作には、電子ビーム露光装置やレーザ露光装置が用いられ、フォトリソグラフィと同様な露光現像工程により、マスクのパターンが作成されます。

除去加工(エッティング)

除去加工(エッティング)は大別して酸やアルカリ等の流体を用いる湿式(ウェット)エッティングと主にプラズマやエネルギービームを用いる乾式(ドライ)エッティングがあります。またエッティング開始点からの加工速度の差に方向性のない等方性エッティングと、ある特定方向に除去速度の高い異方性エッティングがあります。更に異方性にはエッティングする材料の結晶方位により除去速

度に差が生じる結晶異方性エッティングと、おもにドライエッティングの方向性により垂直に加工が進む異方性ドライエッティングとがあります。

MEMSデバイスも電子デバイス同様にパッケージをおこなって完成となります。電子デバイスと異なるのは、必ずしも薄利多売でなく、多品種少量であること、可動部を有することです。このためにパッケージのコストは製品全体のかなりの割合(時に数10%以上)となることがあります。MEMSのビジネス化にとって最も重要な問題です。

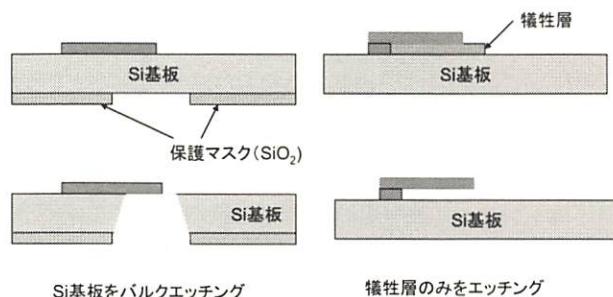


図5 バルクマイクロマシニングおよびサーフェスマイクロマシニングによるカンチレバーの製造

最後にマイクロマシニングに特有の自立構造体の製作について解説します。図5にサーフェスマイクロマシニングとバルクエッティングによる片持ち梁形成の基本プロセスを示します。サーフェスマイクロマシニングではあらかじめ犠牲層を成膜、パターニングし、その上にマイクロ構造体となる材料を成膜します。その後、犠牲層だけを選択除去可能なエッチャントにてウェット、あるいはドライエッティングすると、自立構造が形成できます。バルクマイクロマシニングでは下地のシリコン基板を全部除去してしまいます。できあがった自立膜は静電力や、電磁力等により駆動でき、微少なアクチュエータとして利用したり、逆に外力により変形した状態を計測し、圧力センサや加速度センサを作ったりすることができます。

微細加工のまとめ

以上のようにプロセスについて、簡単にまとめました。実際にはVR技術者が、みずからプロセスを行うことは困難ですので、共同研究者や、ファンドリと呼ばれる委託加工業者に製作を依頼することになります。これまでに解説した事項がデバイス設計に役立つことと期待します。実際のデバイスを作らないまでも、最近はMEMS

の実習を含んだ講習会が各地で行われています。経済産業省の進めている中核人材育成事業のなかにMEMS実習も含まれており、東北大学、東大や産総研もMEMSの異分野の研究者や技術者への技術移転に意欲的に取り組んでいます。

4. HIとセンサ、アクチュエータ

VR技術者が利用したいMEMSで製作したHIについては人間の五感を代替するセンサおよびそれを他の人間に伝達するアクチュエータが考えられます。神経に直接電気信号を入力して、アクチュエータHIを利用しない手法も提案されています[1-2]が、ここでは触れません。もっともよく研究されているのは、視覚および聴覚です。また最近ではゲーム機の入出力ということからモーションセンサ(加速度)も産業界の着目するところとなっています。以下には簡単にHIのなかの視覚および触覚、嗅覚について概説します。

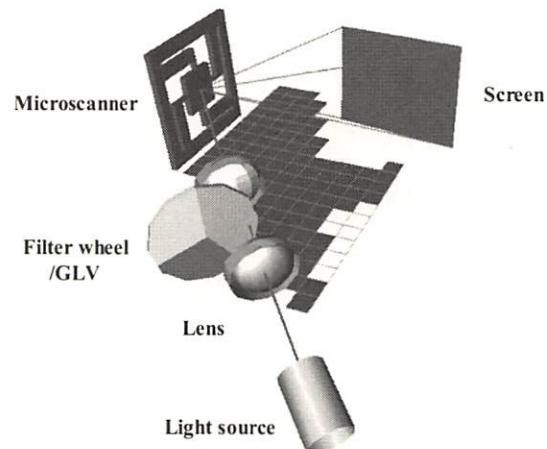


図6 微小な光スキャナを用いたディスプレイ
* 口絵にカラー版掲載

視覚については、CCDカメラが開発されており、他の手段が立ち入る余地は少ないと考えられます。CCDカメラ等はアレー状にならんだ感光素子(ディテクタ)に入ってきたフォトンのエネルギーを電子情報に変えるものです。したがってアレー状の素子を作るためにはどうしても大きさが大きくなります。

そこで考えられるのは可動のミラーをスキャニングして像を取得することです。これで、感光素子は1個で済みますので、全体の大きさが小さくなることが期待されます。

画像の提示素子についても事情は同じです。フォトン

を発する素子をアレー状に並べるか、ミラーを使ってスキャニングして画像を提示するかです。前者の例は液晶やTFTのプロジェクト、ディスプレイがこれに当たります。これらは大きさがかなり大きく、人体とのインターフェースとして考えると、眼鏡の内側に投影させるか、場合によっては視覚神経に直接信号を入れ込むことが考えられます。光スキャナであれば、微小なミラーと発光源が一つのみがあれば良いので、全体の大きさは小さくなることが期待されます(図6)。網膜投写型のディスプレイや、携帯電話に内蔵するモバイルプロジェクタがこれにより実現されます[2]。

触覚について多くの研究開発が様々な観点から行われていますが、応用的な侧面の重要性から、微細な手術について触れます。微細な手術では光ファイバを挿入して行われることが多いのですが、血管壁や胃壁を傷つけることが懸念されます。このために光ファイバの先端部に微小な圧力センサをつけることが研究開発されています[3]。同様に人体の皮膚を疑似したような多点の分布型触覚センサ等の開発[4]も行われています。また細胞等の操作にも、微小な力センサが必要です。いまのところこれらを硬さ情報として、人体にフィードバックする手法の研究開発はあまり進んでいないのが現状です。

嗅覚についても、MEMSで微小な振動子を製作し、吸着した質量変化からにおいをセンシングする試みがなされています。微小な振動センサを製作し、におい分子の吸着量を測定するE-nose(電子の鼻)等のプロジェクトが行われています[5][6]。においのセンシングやガスセンサの研究開発は行われていますが、においの復元については6種類のアロマオイルが入った香り発生装置「アロマジュール」をパソコンにつないで、インターネットでにおいの発信をするような試みがなされています。視覚や聴覚が電磁波や音波であり、センシングと合成が比較的楽なのに比べて、味覚や嗅覚は物質の合成を行う必要があり、比較的研究開発は進んでいないようです。触覚についても前述のようにセンシングはともかく、復元して人体が観測するものが、幾何学形状だけではなく、表面の粘着性や基板の硬さ等の複雑な情報を含むため取り扱いが困難なようです。

5. 終わりに

以上MEMS技術の簡単な紹介とHIへの応用についてごく簡単に概説しました。MEMSは異分野の研究者や技術者にとって、一般に設備投資が高く、プロセスも複雑多岐にわたり、参入のための敷居が極めて高いと言われています。本稿が少しでも敷居を下げる一助になることを期待します。またVRやHI関連のニーズが、MEMSの新しいキラーアプリとなることを期待します。

参考文献

- [1] T. Tateno, A. Kawana, Y. Jimbo, Analytical characterization of spontaneous firing in networks of developing rat cultured cortical neurons, Phys. Rev. E 65, 051924 (2002)
- [2] http://www.microvision.com/wearable_displays/index.html
- [3] T. Katsumata, Y. Haga, K. Minami and M. Esashi :Micromachined 125 m Diameter Ultra Miniature Fiber-Optic Pressure Sensor for Catheter, The Transaction of The IEE of Japan, 120-E, p.58 (2000)
- [4] N. Futai, K. Matsumoto and I. Shimoyama Simulation, fabrication and evaluation of Micro inductor based artificial tactile mechanoreceptor embedded in PDMS
- [5] D. Lange, C. Hagleitner, O. Brand, H. Baltes, CMOS resonant beam gas sensing system with on-chip self excitation. Proc. IEEE MEMS 2001, pp. 547-552 (2001)
- [6] C. Hagleitner, A. Hierlemann, D. Lange, A. Kummer, N. Kerness, O. Brand, and H. Baltes :Smart Single-Chip Gas Sensor Microsystem, Nature, 414, pp.293-296 (2001)

【略歴】

前田龍太郎 (MAEDA Ryutaro)

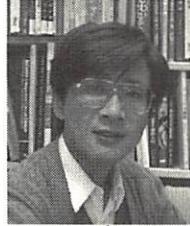
産業技術総合研究所

先進製造プロセス研究部門 主幹研究員

1978年東京大学工学部卒業、1980年東京大学工学系研究科修士課程修了。1980年工業技術院機械技術研究所入所、2007年より現職。専門は3次元微細加工と強誘電体薄膜アクチュエータ。著書『MEMSのはなし』、『ナノインプリントのはなし』。

特集 ■ VRとMEMS技術

動きを感じる



前中一介

MAENAKA KAZUSUKE

兵庫県立大学

1. はじめに

近年の MEMS デバイス、特に慣性センサすなわち加速度センサおよびジャイロ(角速度センサ)の発展・普及には目を見張るものがある。加速度センサは、乗用車のエアバッグコントロール用の検出デバイスとして急速な発展を見せ、またジャイロはカメラの手ぶれ補正および乗用車の横滑り制御、ナビゲーションの補機として急速に進歩しつつある。本稿ではこのような MEMS 技術による慣性センサの技術的側面を中心に、動きを感じるデバイスとしての特性、現状をまとめると。

2. 慣性航法と MEMS デバイス

動きを感じる、すなわち対象物が存在する座標、およびその変化を自立的に知るためにには3軸の加速度、3軸の角速度を検出これらに対して積分処理をすればよいことになる。第2次世界大戦以降、ミサイルやロケット、潜水艦、宇宙航空機器など、外部の参照物なしに自立的に運動する機器のため、慣性センサの研究開発が盛んとなった。これらは価格やサイズよりもむしろ特性の絶対値を向上させることに努力が注がれた。今日では慣性航法用として、高精度のサーボ加速度計とリングレーザジャイロ(それぞれ $100\mu\text{G}$ 、0.01度/時のレベルの精度のものが入手できる)を用いて姿勢角0.01度、方位角0.05度の精度で姿勢検出を行うことができる[1]。しかしこれらの機器は大型で重く(20cm立方、数kg程度)また相当に高価格(数百万~数千万円)であり、とうてい乗用車やカメラ、玩具などの民生品に導入することはできず、20年前には慣性検出デバイスの民生品への組み込みは難しいとされていた。しかしながら MEMS 技術の進展(我が国では古くはマイクロマシニングと呼ばれていた技術とほぼ等しい概念)に伴い、特性は犠牲にしても小型軽量で安価な慣性センサの開発が進み、現在では数mm角以下の加速度センサ、ジャイロが容易に(例えば量産時には加速度センサは1軸あたり100円以下、と言われている)入手可能となってきており、またその特

性も(従来型の慣性航法用に開発された機器にははるかに及ばないながらも)年々向上の一途をたどっている。図1に市販の MEMS 慎性センサの一例を示す。

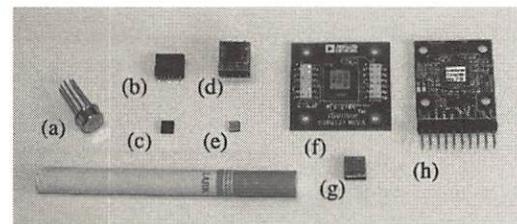


図1 市販慣性センサの一例

加速度センサ : (a) ~ (c) Analog Devices Inc. (d) Kinonix, (e) DTS
角速度センサ(ジャイロ) : (f)(g) Analog Devices Inc., (h) InvenSense.
(f) はデジタル出力、(d)(f)(h) は評価基板上に実装済み

3. 加速度センサと角速度センサ

動きを感じるためには、図2で示すような慣性力を用いることができる。質量 m に発生する力 F_a は、与えられた加速度 $a=d^2r/dt^2$ と運動方程式 $F_a=ma$ で関係づけられているため、何らかの方法で発生した力 F_a を計測すれば加速度を検出することができる。また、計測値を2階積分すれば座標 r を算出することができる。一方、角速度は、コリオリ力ないしはサニヤック効果を用いて検出することができる[2]。高精度な従来型ジャイロでは光に働くサニヤック効果を用いるものも多いが(FOB: Fiber Optic Gyro, RLG: Ring Laser Gyro など)、現在のところ MEMS ジャイロではほとんどが振動する質量に働くコリオリ力を用いた構造となっている。コリオリ力 F_c は、図2(b)に示すように速度 v で運動する質量 m に角速度 $\Omega=d\theta/dt$ が与えられたときに発生する、 $F_c=2mv\times\Omega$ (\times は外積を示す)で計算できる座標変換に基づく見かけの力である。一般には MEMS ジャイロでは質量を振動させ、交番的な v を与えておき(この振動を参照振動と呼ぶ)、角速度印加とともに発生する参照振動方向と直交す

る交番力を検出することによって角速度を得ている。

当然ではあるが、加速度と角速度は全く異なる物理量であり、例えば加速度センサを用いて遠心力を測定し、そこから何らかの演算を行って角速度を求めると言うことも原理的には可能であるものの現実的ではなく [3]、角速度は角速度検出専用のジャイロによって計測せざるを得ない。

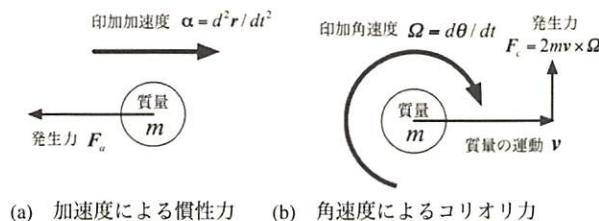


図 2 加速度と角速度検出原理

4. MEMS 加速度センサ

4.1 基本的構造と原理

MEMS 加速度センサは、いわゆるサイズモ系(質量とそれを支えるバネからなる系)で構成されている。バネと質量は母材となるシリコンで一体形成されている例が多く、市販の製品ではサイズモ系に検出機構を組み合わせたシリコンを中心とした構造体と、周辺回路(集積回路)を組み合わせてモールドされている例が多い。図3に最も原理的なMEMS加速度センサの構造例を示す。ヒンジ(バネ部)と可動質量はシリコン基板のエッチングによって形成されており、加速度によって質量部が上下に変位する。その変位を例えば図のように、電極を兼ねたシリコン質量とケース部分に形成した固定電極間の静電容量の変化によって計測し、加速度を算出する。ヒンジの部分は加速度による質量の変位によって応力を受けるため、ヒンジ上に応力によって抵抗値が変化するピエゾ抵抗素子[4]などを形成しておけば抵抗変化によって変位を検出することもできる。この方法は、ウエハの厚さをそのまま質量にすることができるため、大質量のセンサが実現できる反面、ヒンジ部分の厚さのコントロールが難しく(これは感度精度に直接影響を与える)、

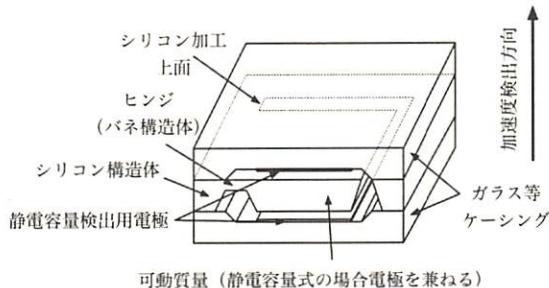


図 3 単純な構造の加速度センサ

柔らかいバネ構造が作りにくい、ウエハの貫通加工が必要であるため製造スループットに限界がある、ガラスなどの集積回路プロセスに対する汚染源を含むなどの問題もあり、質量部分の薄膜化(2~50μm程度)を図りこれらの問題を解決しようとするものも多い。これら薄膜を用いたものでは、シリコン基板上にポリシリコン薄膜を堆積させ、これを可動構造体として用いたものや、SOI基板(Silicon On Insulator)のアクティブ層、あるいは再結晶化層を可動構造体として用いたものなどがある。以下、これらについて述べる。

4.2 ポリシリコン薄膜を構造体として利用した加速度センサ

ポリシリコンは集積回路の標準プロセスで用いられる材質であり、集積回路プロセスとの結合に適している。ポリシリコンなど、薄膜の堆積によって可動構造体を形成する方法を図4に示す。これはいわゆる表面マイクロマシニングと呼ばれる技術である。この技術と集積回路技術の1チップ集積化例としてAnalog devices, IncのADXLシリーズがある。このシリーズでは、表面マイクロマシニング技術による薄膜構造体(構造体厚2μm、構造体全体のサイズ約500μm角)と、BiCMOS集積回路が2~3mm角程度で一つのチップ上に集積されており、電源を与えるだけでボルトオーダーの検出出力を得ることができる。構造体概念を図5に示す。薄膜の可動構造体は質量、バネ、固定部および検出用電極から形成されており、可動構造体の電極と対向する形で固定電極が形成されている。可動構造体と固定電極間で二つの静電容量を形成しており、これら静電容量C1, C2は構造体静止時には等しい容量を持つように設計されている。今、同図(b)のように加速度が印加されると慣性力でバネが変形し、可動構造体が変位する。この変位は固定電極と可動電極間の距離を変化させ、これに伴ってC1, C2が差動で変化する。この静電容量変化を計測することによつ

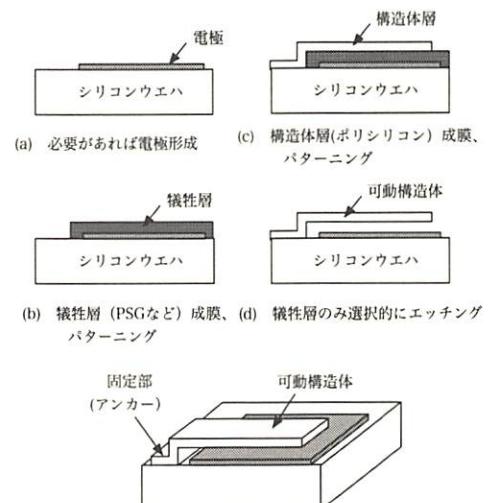


図 4 表面マイクロマシニングの概念

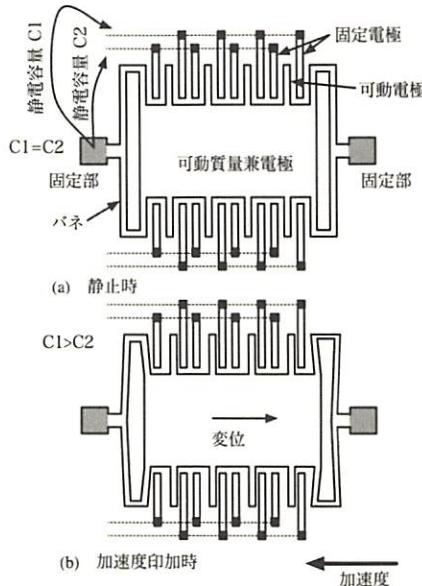


図5 ADXL 初期型の可動構造体概念図
実際には、より多数（数十本）の櫛歯状電極が形成されている

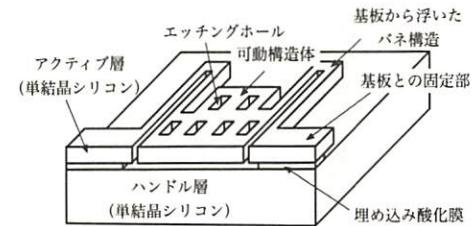
て加速度を検出する。一般にこのタイプの加速度センサでは、静電容量の絶対値および変位の絶対値が極めて小さく、例えばADXL05では変位は1Gあたり数nm以下、静電容量は数分の1fF程度であり、これらを安定に精度良く計測する周辺回路技術が重要になる。

4.3 SOI 基板を用いた加速度センサ

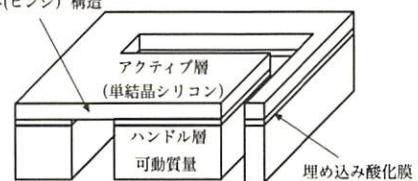
SOI 基板は、厚いシリコン基板（厚さ500μm程度、ハンドル層と呼ばれる）上に酸化膜（厚さ1μm程度、埋め込み酸化膜と呼ばれる）、さらにその上に数～数十μmの厚さのシリコン層（アクティブ層と呼ばれる）が接合された構造を持つ基板である。中間に酸化膜を持つことから、図6のようにアクティブ層を構造体層として用いたり、ヒンジとして用いたりすることができる。図6(a)では図4と同様の考え方で、上面からのシリコンエッチングにより構造体を形成し、薬液によるエッティングによって構造体下の埋め込み酸化膜を選択的にエッティングし、構造体を可動とする。また図6(b)では上面からのシリコンエッチング、下面からのシリコンエッチング、不要な埋め込み酸化膜の除去、という工程で構造体が形成できる。

アクティブ層は比較的精度の高い厚さコントロールが行われており、しかも単結晶であるためその機械的特性は優れている。さらに、作製プロセスが比較的簡単であるという特徴を持っており、各種の形状のものが提案され実用化されている。また、SOI 基板は2枚のウエハを貼り合わせる、という手法で形成するが、ポリシリコンを成膜した後、レーザなどで熱を与えてポリシリコンを再結晶化させ、同様な構造を形成する手法もある。

図7に、具体的な加速度センサ構造例を示す。この



(a) アクティブレイヤーを可動構造体とする例
(上面からエッティングホールを経由して
構造体下の埋め込み酸化膜をエッティングする)



(b) アクティブ層をパネ(ヒンジ)構造とし、
質量としてハンドル層を使用する例

図6 SOI ウエハによる可動構造形成
(センサデバイスとしての検出機構等は省略)

構造は、3自由度を持っており、x, y, z方向の加速度を同時に検出することができる。SOI ウエハのハンドル層をおもりとしてデバイス中央に配し、アクティブ層をヒンジとしておもりを四方から支える。それぞれのヒンジ上にはヒンジ表面に発生する応力を検出するためのピエゾ抵抗素子が形成されており、これらの出力は独立に計測できる。ウエハ表面に対して垂直な加速度が印加したとき、すべてのヒンジには同じ応力が発生するため、ピエゾ抵抗素子の変化量を加算した値が印加された加速度に対応する。また、ウエハ平面に平行な加速度が印加すると、加速度と平行な方向に配置するピエゾ抵抗には逆方向の応力が与えられ、これらの変化量の差が与えられた加速度に対応する。図7では、ピエゾ抵抗の温度特性を補正するための温度センサ回路が同チップ上に形成されている。近年では、加速度センサには小型化や低価格化のほか、多軸化への要求が高まっており、様々な構造のものが市場に投入されつつある状況である。

4.4 デジタル出力とパッケージング

最近では一般にMEMS 加速度センサやMEMS ジャイロはマイクロプロセッサを核とした電子装置システムの一部として用いられるケースが増えてきた。この際、センサパッケージ内にデジタル変換回路を入れ、必要なデジタル処理（例えば温度補正やフィルタリングなど）を行った後に outputすれば、システム側の負荷が少なくてすむ。このような観点から、センサチップ内にデジタル回路を組み込む例が多くなってきた。このような場合、最もスマートな手法はデジタル集積回路の中に1チップで加速度センサやジャイロなどの構造体を組み込む方法であるが、歩留まりや周辺システムの組み替え容易さか

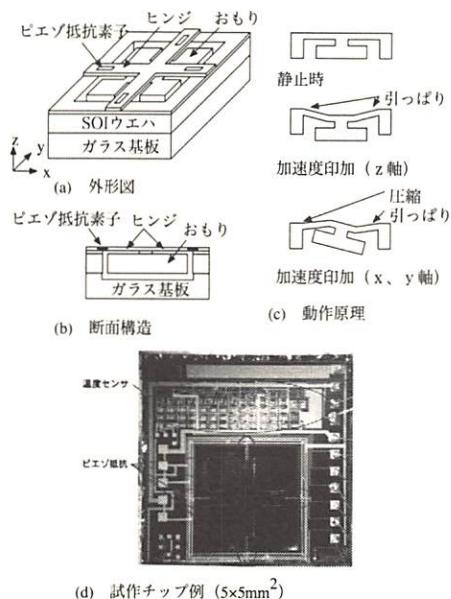


図 7 3 軸加速度センサ構造例

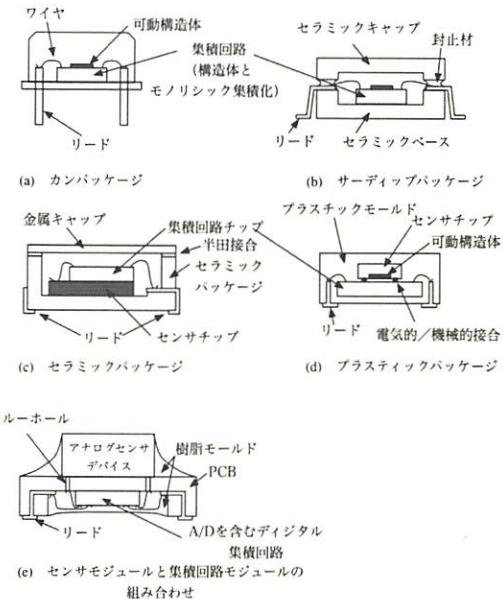


図 8 各種のパッケージング

ら、センサ構造体と集積回路を別チップとしてパッケージ内に組み込む場合が多い。サイズモード加速度センサおよびジャイロは、必然的に物理的な変位が発生するため、通常の集積回路のようなモールドパッケージを使用する際には工夫が必要である。図 8 に、様々なパッケージング例を示す。図 8(a), (b), (c) は簡単な方法で、カン、サーディップ、セラミックパッケージなど、原理的に内部に空間が存在するパッケージにセンサ構造体をそのまま封入するスタイルである。インターフェイス用集積回路チップを同時に封入する場合には、フットプリント(パッケージ取り付け面積)を低減するため、同図(c)のようにセンサチップと集積回路チップを積み重ねこれらをボンディングワイヤで結合するなどの方法もとられる。セラミックパッケージのものでもかなり小型のものがあり、(c) のような方法で $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ 程度の 3 軸型加速度センサも市販されている。同図(d) は集積回路チップとセンサチップを互いのアクティブな領域同士を向かい合わせて電気的、機械的に結合させて可動構造に対する閉空間を作り、全体を樹脂でモールドする、という方法である。この方法を用いると、樹脂モールドが基本的にセラミックパッケージよりも低価格であることによると、無駄な空間がなくなり、小型化・低価格化が期待できる。さらに、アナログ出力のセンサを外付けのデジタル回路とプリント基板(PCB)を用いて再モジュール化する同図(e) のようなものもある。最近では小型化、低価格化の要求から、樹脂モールドのパッケージが増えきており、チップの結合方法や構造体設計、集積回路の内容など詳細な部分について各社のノウハウが隠されている。

5. MEMS ジャイロ

この数年、シリコンを母材とする MEMS ジャイロの市販例が増えてきた。これらはほとんどコリオリの力を利用する振動型ジャイロである。基本的には質量を数 kHz ~ 数十 kHz で定常的に振動させ、角速度によって発生するコリオリの力を加速度センサの原理で検出する構造となっている。理論的詳細は文献 [5-7] に譲るが、MEMS デバイスで発生するコリオリ力は一般には激烈に小さく、その安定な検出には相当な努力が必要であり、構造設計、周辺回路、パッケージングなど各社様々な努力の跡が見受けられる。加速度センサと同様に、表面マイクロマシニングを用いたもの、SOI 等のような(中程度の厚さ)薄膜構造体を用いたもの、ウエハ厚さ全体にわたって加工したものなどの市販例がある。また、定常振動(参照振動)を与える方法およびコリオリの力による変位を検出する方法も様々提案されているが、今のところ静電引力で振動させ、静電容量で変位を検出する方法、電磁駆動で振動させ誘導起電力を検出する方法、ピエゾ(圧電)薄膜で駆動し、ピエゾ薄膜で検出する方法などが実用化されている。

5.1 静電引力駆動、静電容量検出の例

図 9 に構造概念を示す。この構造は表面マイクロマシニングや SOI ウエハを用いて構成することができる。参照振動とそれと直交する検出方向の自由度を持たせるため、中央の振動質量は二つの曲げ容易軸が直交したバネで支えられる。構造体内部に設置された櫛歯状のアクチュエータ A, B に交互に電圧を印加することによって中央の質量は C のバネを曲げながら上下に振動する。このとき、z 軸回りに角速度が印加すると、参照振動に

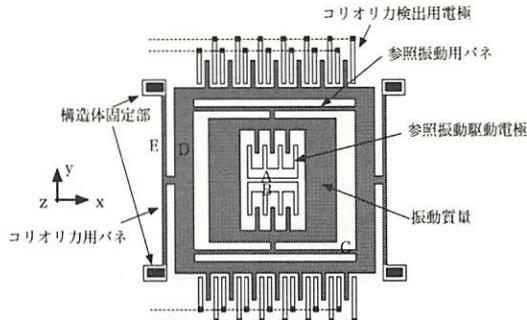


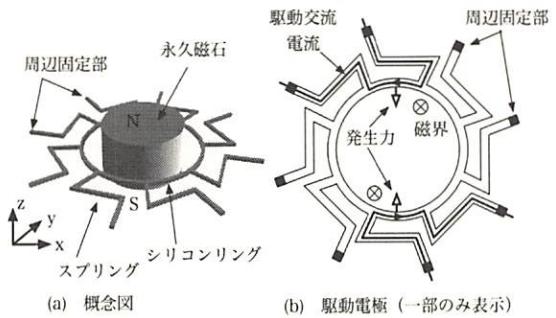
図9
平面内に自由度を持つ静電引力駆動、静電容量検出型ジャイロの概念図

同期して質量には x 方向に交番コリオリ力が発生する。外周構造体 D は x 方向に柔らかいバネ E で支えられているため、コリオリ力の発生は D を x 方向に変位させる。加速度センサの項(図5)で説明したように、この変位は構造体と周囲に配置させた固定電極間の間隔を変化させ、静電容量を変化させる。これがこのデバイスの検出出力である。実際には回転や不要な並進運動に対して堅いバネ構造が作り込まれ、また、加速度の影響をキャンセルするために逆方向の参考振動を持った二つのデバイスの出力の差をとるなどの工夫が行われる[8]。また、参考振動として並進運動、検出を回転振動としたもの[9]、参考振動を回転振動としたもの[10]など、様々な構造が提案されている。

すでに述べたように、MEMS ジャイロの出力変位は極めて小さい。これは、浮遊静電容量、センサチップの熱応力等、外的な擾乱に弱いことを意味する。従って、適切な構造の設計と共に、微小な静電容量を安定に検出する回路、チップのマウントの方法など、周辺の技術も十分に配慮し、発展させなければならない。一部の製品では(Analog devices, Inc の ADXRS シリーズ)駆動回路・検出回路と上記構造体を1チップで集積化し、浮遊静電容量等の低減、低コスト化を図っているものもある。他の製品ではほとんどの場合、センサチップとは別に駆動・検出のための集積回路がモジュール内に内蔵され、電源電圧を与えるだけでボルトオーダのアナログ出力あるいはデジタル出力が得られるようになっている。

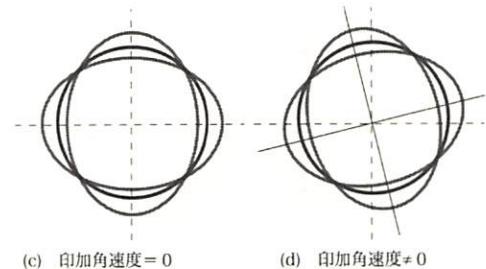
5.2 電磁駆動、誘導起電力検出型

図10に電磁駆動、誘導起電力検出型の例[11]を示す。このジャイロは同図(a), (b)に示すようにリング形状となっており、リング上に駆動電極、誘導起電力検出電極が配置され、中心に永久磁石が組み込まれている。駆動電流としてリングが同図(c)のように梢円振動するような交流を与える。今角速度が z 軸回りに印加すると、リングの振動に対してコリオリ力が働き、梢円運動の振動軸が回転する。これをリング上に配した検出電極でモニタリングし、角速度信号を得る。電磁駆動は一般的に大



(a) 概念図

(b) 駆動電極 (一部のみ表示)



(c) 印加角速度 = 0

(d) 印加角速度 ≠ 0

図10 リング型ジャイロ、電磁駆動・誘導起電力出力

きな駆動力を得やすく、また、配線に発生する誘導起電力はインピーダンスが低いためノイズが少なく、比較的容易に良好な特性を得ることができる。このセンサは電動の立ち乗り二輪車、セグウェイに搭載されていることでも有名である。電磁力を用いたジャイロにはこの他ジンバル構造を持ったもの[12]や音叉構造を持ったもの[13]などが提案されており、比較的良好な特性を持っているものが多いが、永久磁石を使用しなければならないことから小型化が難しく、また究極的な低価格化が難しいという欠点もある。

5.3 圧電駆動、圧電検出型

ジャイロの場合、構造体の設計以外に、駆動、検出方式の選定がデバイスの特性を特徴づける。すでに述べた静電引力・静電容量タイプは、小型化が可能であるが参考振動を発生させるための大きな力の発生が難しく、また微小な静電容量変化を精度良く検出する回路に負担がかかる。また、電磁力、誘導起電力タイプは大きな力が容易に発生できまた信号検出も比較的容易ではあるが磁石の存在にかかわる問題点(小型化の限界、磁石設置にかかるコスト)がある。シリコン MEMS のジャイロが進歩するまで、もっぱら小型低価格のジャイロは、金属加工された構造体と圧電材料を貼り合わせたもの、あるいは圧電材料そのものを加工したもののが多かった。これは、圧電材料は電圧を印加すると変位し、逆に変位(応力)を与えると電圧が発生するという特性がジャイロの機能に合致するためで、最近では PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)の薄膜をシリコン構造体に形成し、ジャイロ構造を実現する例も現れてきた。図11にその構造例を示す[14]。構造そのものは極めて単純で、かつある程度の

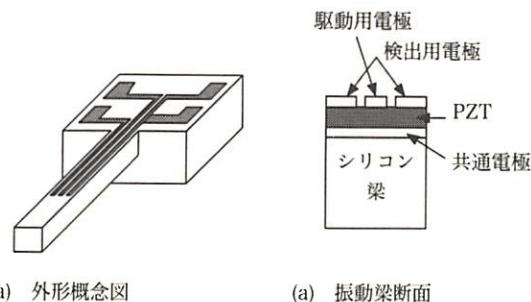


図 11 圧電駆動、圧電検出の片持ちジャイロ

高感度を得ることができる形状である [15]。片持ちの梁には圧電薄膜が形成されており、その上に 3 本の電極が設置される。中央の電極に交流電圧を印加して、梁をその共振周波数で上下方向に励振する。梁の長手方向回りの角速度が印加されると梁にはコリオリ力によって左右の振動が誘起され、左右の電極から発生する電圧に差が生じる。これがこのデバイスの動作原理である。形状は極めて単純で、1 パッケージにこのデバイスを 2 個直交して配置すると 2 軸のジャイロが容易に実現できる。市販品ではこのような方法で 2 軸化し、駆動・検出回路を組み込んで数 mm 角のフットプリント、1mm 強の厚さにモジュール化されている。

6. おわりに

MEMS 加速度センサおよび MEMS ジャイロについてまとめた。現在では非常に多くの会社から使いやすい製品が低価格で販売されている [16]。しかしながら、もっぱらこれらの製品は第一に低価格化、第 2 に小型化が重視され、性能の向上についてはまだこれからというように思われる（原理的に、慣性力は質量に比例、すなわちサイズの 3 乗に比例するため、小型化と高分解能化は背反する要求ではある）。特に、ヌル電圧（加速度や角速度を印加しない場合の出力電圧）の精度は比較的悪く、出力を直接積分して位置や方位を検出することは難しい状態にあると思われる。一般には直流カットのフィルタ、カルマンフィルタなどで性能の補償を行って、限られたではあるが慣性航法システムを構築する動きもある。さらに、最近ではサイズや価格をある程度に抑えたうえで、性能重視で研究開発する例も出てきており、今後選択肢は増えていくことと思われる。

参考文献

- [1] 多摩川精機編、「ジャイロ活用技術入門」、工業調査会（2002）
- [2] A. Lawrence: *Modern Inertial Technology Navigation Guidance and Control*, Springer-Verlag, New York (1993)
- [3] 前中、前田：加速度センサを用いた角速度検出に関する一検討、電学論 E, 118-E, pp.341-342 (1998)
- [4] 藤田編著：*EE Text センサ・マイクロマシン工学*、第 4 章、オーム社 (2005)
- [5] 前中、藤田、前田：シリコンマイクロジャイロにおける設計上の問題点と指針、電学会研資、PS-96-10, pp.33-42 (1996)
- [6] J. Soderkvist: *Micromachined gyroscopes, Sensors and Actuators A* 43, pp.65-71 (1994)
- [7] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi: *Micromachined Inertial Sensors*, proceedings of the IEEE 86, pp.1640-1659 (1998)
- [8] J. A. Green, S. J. Sherman, J. F. Chang, and S. R. Lewis: *Single-Chip Surface Micromachined Integrated Gyroscope With 50 deg/h Allan Deviation*, IEEE J Solid-State Circuits, Vol.37, No. 12, pp.1860-1866 (2002)
- [9] US Patent, US6892575, US6939473
- [10] T. Fujita, K. Maenaka, T. Mizuno, T. Matsuoka, T. Kojima, T. Oshima and M. Maeda: *Disk-shaped bulk micromachined gyroscope with vacuum sealing*, Sensors and Actuators, 82, pp.198-204 (2000)
- [11] B. Johnson: *Vibrating Rotation Sensors*, SAE Technical Papers, 950534 (1995)
- [12] K. Maenaka, S. Ioku, N. Sawai, T. Fujita and Y. Takayama: *Design, Fabrication and Operation of MEMS Gimbal Gyroscope*, Sensors and Actuators A, 121/1, pp.6-15 (2005)
- [13] M. Lutz, W. Golderer, J. Gerstenmeier, J. Marek, B. Maihofer, S. Mahler, H. Munzel, and U. Bischof: *A precision yaw rate sensor in silicon micromachining*, International Conference on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS '97, vol. 2, pp.847-850 (1997)
- [14] 三宅：ソニーが MEMS 専用ラインを新設へ手ブレ防止ジャイロを増産、日経マイクロデバイス, pp. 71-72 (2005 年 9 月号)
- [15] K. Maenaka, T. Fujita, Y. Konishi and M. Maeda: *Analysis of highly sensitive silicon gyroscope with cantilever beam as a vibrating mass*, Sensors and Actuators, A54, pp.568-573 (1996)
- [16] http://www.sensorsportal.com/HTML/SENSORS/Accelerometers_Manuf.htm (2007 年 7 月現在)

【略歴】

前中一介 (MAENAKA Kazusuke)

兵庫県立大学 大学院工学研究科 教授

1984 年豊橋技術科学大学大学院情報工学専攻修了。同年豊橋技術科学大学電気・電子工学系電子デバイス大講座教務職員、1989 年より神戸市立工業高等専門学校電子工学科講師、1993 年より姫路工業大学工学部電子工学科助教授、2004 年より県立大学併合により兵庫県立大学 大学院工学研究科助教授、2007 年より現職。専門はセンサ、MEMS 工学。著書『センサ・マイクロマシン工学(共著)』、『光半導体デバイス(共著)』など。

特集 ■ VRとMEMS技術

形を感じる～超音波マイクロアレイセンサ～



山下 馨
YAMASHITA KAORU



奥山雅則
OKUYAMA MASANORI

1.はじめに

空気中での三次元計測においては、カメラで捉えた画像を処理して三次元情報を抽出するシステムや、レーザ・レーダーを用いて直接距離計測を行ない形状を把握するシステム等が開発されている。これらは、一般に超音波計測に比べて高い解像度で情報が得られる利点を持つが、反面、画像処理のための大がかりなシステムを必要としたり、スキャンのために計測に時間がかかる、あるいは近距離の計測では距離精度が悪くなる等の弱点を持つ。また監視システム等の用途を考えると、照明や日光等の環境光、あるいは火災時には煙の影響を受け易く、さらにはプライバシ保護の観点からカメラそのものが適用できない場合もある。

このような用途には、超音波による計測システムに利点がある。音速は光に比べて約百万分の一の伝搬速度を持つので、近距離でも容易に比較的高い精度で距離計測が可能である。煙や熱源の存在にも左右されず環境光の影響も受けない。また視覚的画像情報ではなく形状・距離情報が得られるので、被観察者のプライバシを侵害することがない。画像のように膨大な一次情報を処理する必要が無いので大がかりな信号処理・情報処理システムを必要とせず、小型化が可能である。

本稿では、これら超音波計測の利点を生かしたアプリケーション用としてこれまで研究開発を行なってきている超音波センサと計測系について紹介する。本研究では、リアルタイム計測可能で、家庭用自走型ロボット等をはじめとした機器に組み込んで使用可能な小型のシステム化を目指しており、計測対象としては、2～3m程度以内の距離範囲で例えば人体程度の大きさまでの物体の存在しないし大まかな形状を検知することを目標としている。

2. 空中超音波用アレイセンサによる計測法

2.1 使用周波数の条件

超音波は「聴くことを目的としない音」とされているが、人間の可聴域から超音波の下限周波数は 20kHz ということになる [1]。容易に入手できる超音波センサや発信子としては 30～40kHz のものが安価に市販されている。一方上限の周波数は、実用的には媒質中での減衰により制約を受ける。空気中や水中での超音波の吸収減衰はおよそ周波数の二乗に比例して大きくなるが、空気中では水中に比べて低い周波数でも非常に減衰が大きい。一例として、吸収により音圧が 1/10 になる距離を比較すると、水中では 1MHzにおいて 70～80m, 100kHz ならば数 km となるのに対し、空気中では 100kHz で 6～7m, 200kHz では 3m 前後となり、1MHz では数 cm 程度である [1]。このことから、数 m 程度の計測範囲では実用的には 100～200kHz 程度が使用可能な上限周波数となる。空気中の音速は 340m/s 前後であるので、波長の下限は 1.7～3.4mm 程度となる。表面荒さが波長より十分小さな物体表面では音波はほとんど散乱されないので、

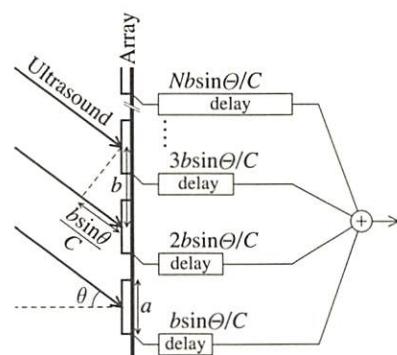


図1 超音波入射角度と遅延加算の原理

この周波数域では日常身の周りにある滑らかな表面を持つ金属やプラスチック製品などは鏡面反射体となる。

2.2 遅延加算による電子的角度走査

超音波診断装置や金属等の探傷装置では、細く絞った超音波ビームを走査することにより画像を得ているが、空気中では 1m の距離を音波が往復するのに約 5.9ms を要するので、この程度の距離範囲内でビーム走査により三次元計測を行なおうとするとリアルタイム化は困難である。そこで本研究では、一発の球面波パルスを送信して、一回分の反射波をアレイで受信しながら電子的に走査することにより三次元情報を得ている。この場合、アレイには全方位からの反射波が同時期に入射することになるが、遅延加算演算を行なうことにより特定の方向の信号を取り出すことができる。図 1 に示すように、アレイ面に対して θ 方向から音速 C の音波が入射する際、反射波の波面は周期 b で並ぶ各センサ素子に対して $b \sin \theta / C$ だけの時間遅れをもって到着する。従って、各センサ素子の出力波形を $b \sin \theta / C$ ずつ遅延して加算すると、 $\theta = \theta$ となった時に信号の位相が一致し加算後の強度が増大する。遅延加算演算は、一度の受信信号に対して複数方向の走査を信号処理回路内で行なうことができるので、 θ を電子的に走査することにより実際の入射角度 θ を求めることができる。

2.3 アレイの素子配置と指向性

図 1において、素子数 N のアレイによる指向性(特定の角度に対する相対感度) $s(\theta, \Theta)$ は、波長を λ として

$$s(\theta, \Theta) = \cos \theta \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi N b}{\lambda} (\sin \theta - \sin \Theta)\right)}{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda} (\sin \theta - \sin \Theta)\right)}$$

で表される。ここで右辺第 2 項は素子の大きさ a による影響を表し、 $a \ll \lambda$ ならば θ の値に関わらずほぼ 1 である。これは、波長に比べて十分小さければ、素子単体としては無指向性とみなせることを示している。右辺第 3 項がアレイのサイズおよび素子密度に関する項である。この項は $\theta = \Theta$ で最大値 N をとり、これがメインロープとなる。メインロープの尖鋭度(通常半幅値で表す)はほぼ $N b / \lambda$ に反比例して鋭くなることが示され、波長を単位として測ったアレイの径の大きさが角度方向の分解能を決定する。素子密度が指向性に与える影響は、メインロープ以外の感度極大点として表れる。素子周期 b を大きくすると、まず $N b / \lambda > 1$ において $\theta = \Theta$ 以外にも

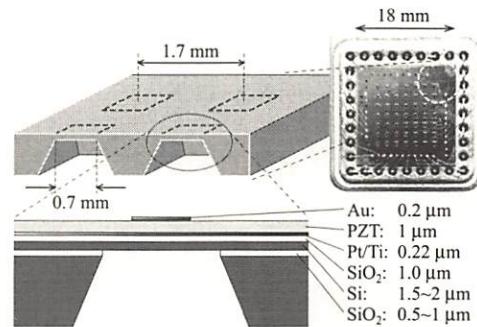


図 2 超音波マイクロアレイセンサの構造とチップ写真

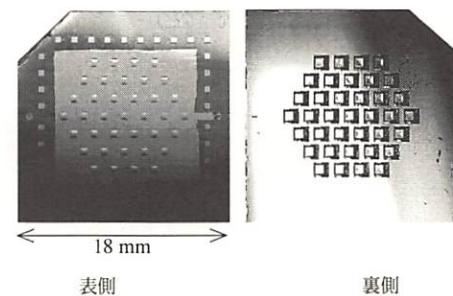


図 3 リングアレイ型超音波マイクロセンサの写真

極大・極小のピークを持つようになり、 b / λ の増大とともに数と強度が増す。ここではこれをサイドロープと呼ぶ。また $b / \lambda > 1/2$ となると、走査角度によってはメインロープと同じ強度を持つサイドロープ(グレーティングロープ)が生じ、ゴーストの原因となる。

以上をまとめると、角度方向の分解能を上げるためにアレイの径(両端の素子間の距離)を大きくする必要がある。この意味では分解能は素子数と直接関連せず、光学デジタルカメラのように素子数イコール画素数のような直接的な関係はない。しかし個々の素子間隔を大きくするとサイドロープが目立つようになり、半波長を越えて大きくするとグレーティングロープが生じる。したがって素子間隔はある程度狭くせざるを得ず、結果として多くの素子数を必要とすることになる。

3. 超音波マイクロアレイセンサの作製

3.1 アレイセンサの構造

我々の用途では、小型の機器組み込み用等を目標とし、チップサイズは 1 ~ 2cm 程度としている。図 2 に超音波マイクロアレイセンサの構造の模式図とチップ写真の例を示す。チップサイズは 18mm 角で、32 ピンパッケージのサイズに合わせてある。チップ上にはセンサ素子を 7x7 の矩形状に配置している。また素子の配置は図 3 に示すようなリングアレイ形状のものも作

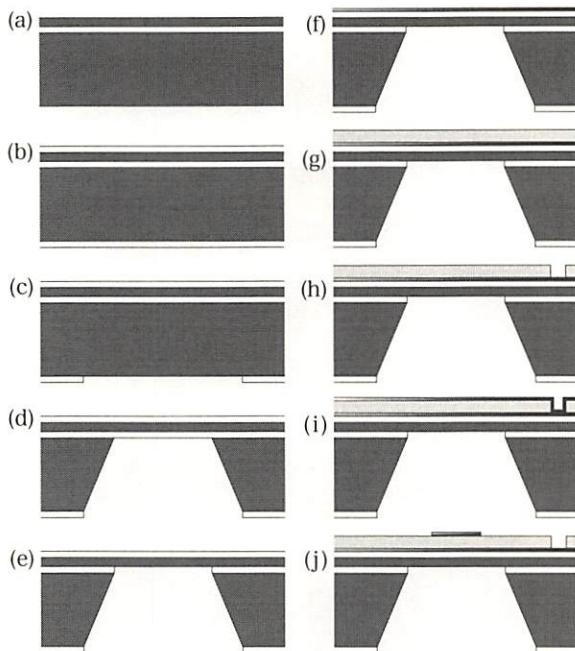


図4 超音波マイクロセンサの作製プロセス

製している。各素子は図2に示すように、基板の一部分を掘り込んだダイアフラム構造を持つ。振動検知部分の積層構造は、支持層としてのシリコンおよびシリコン酸化膜部分とその上に設けられた下部電極(Pt / Ti薄膜), 圧電体層($Pb(Zr,Ti)O_3$ 薄膜, 以下PZT), 上部電極(Au薄膜)によるキャパシタ部分からなる。図2に示すサイズと積層厚みは、ダイアフラムの撓み振動による共振周波数を約100kHzとするよう設定している。超音波がセンサに入射すると、この共振周波数でダイアフラムが振動し、ダイアフラム上に設けた圧電体層に面内方向の歪みを生じる。圧電体は面内歪みを厚み方向の分極変化に変換し、上下両面に設けられた電極間の電位差として信号を取り出すことにより超音波を検知する。

3.2 センサ作製プロセス

図4に本マイクロセンサの作製プロセスを示す。(a)出発基板として、SOI(silicon on insulator)ウェハを用いる。(b)異方性エッティング(後述)用のマスク層として、ウェハ両面にシリコンの熱酸化膜を形成する。(c)裏面の熱酸化膜に異方性エッティング時のマスク用パターンを形成する。(d)TMAH(tetramethylammonium hydroxide)水溶液を用いた異方性エッティングによりダイアフラム構造を形成する。シリコンの結晶方位に従って約54.7°の傾斜を持つエッティングホールが形成され、SOIの埋め込み酸化膜層が露出した時点でのエッティングはほぼ停止する。(e)SOIの埋め込み酸化膜層を

除去する。(f)rfマグネットロンスパッタリング法により下部電極としてPt / Ti薄膜を形成する。Pt薄膜は、後のPZT層製膜時の高温環境(酸素雰囲気中600°C)でも安定で、シリコン上に容易に高配向の薄膜を形成することができ、また格子定数がPZTに近い等、PZT薄膜の下地材料としても良好な特性を持つ。しかしながらPt薄膜はそのままではSiや SiO_2 上の密着性が悪いので、薄いTi薄膜の層を間に挟むことにより密着性を向上している。(g)下部電極上に、ゾル・ゲル法(後述)を用いて圧電体PZT薄膜を形成する。(h)下部電極へのコンタクトホール形成のためPZT薄膜をエッチングする。(i)上部電極としてAu薄膜をrfマグネットロンスパッタリング法により形成する。強誘電体の上部電極としてはPtが用いられることが多いが、本センサでは抵抗率と残留応力が低いAuを用いることによりダイアフラムの振動を妨げる剛性および内部応力の増加を極力回避している。(j)沃素と沃化カリウムの水溶液によりAu薄膜をエッチングし、上部電極のパターンを形成する。振動する圧電ダイアフラムでは、発生する分極が面内の中心部と周辺部で符号が変わる[2]ため、信号を効率良く取り出すために電極形状を最適化して形成している。

本プロセスの特徴は次のようにまとめられる。

1. バルクマイクロマシニングによりセンサ構造を作製しており、超微細加工を必要としない、簡便で安価なプロセスである。
2. 圧電体(PZT)層の形成にはゾル・ゲル法を用いている。ゾル・ゲル法とは、有機ないし無機金属化合物溶液(前駆体溶液)をスピンドルコート等により基板上に塗布した後、加水分解、重縮合反応を進ませてゲル化し、ゲルを熱分解・酸化させることにより固体酸化物を作製する方法である。強誘電体(圧電体)薄膜を作製する方法としては、スパッタリング法やCVD法に比べて大がかりな真空装置を必要としない極めて簡便な方法であり、大面積で均一な薄膜が低コストで製膜できるという特徴を持つ。
3. PZTは異方性エッティング用のアルカリ溶液に長時間は耐えないので、PZT製膜後にダイアフラムを形成する場合は何らかの表面保護が必要となる。本プロセスでは先にダイアフラム構造を形成した後に圧電層を形成しているので、異方性エッティング時に表面保護の必要がない。
4. 完成したダイアフラムは残留応力のため静的撓みを持つ。この撓み量と方向を制御することにより、平坦なダイアフラムに比べて大幅に感度を向上している[3]。以上のプロセスを連続して行った場合、3~5日間の作業でセンサが完成する。

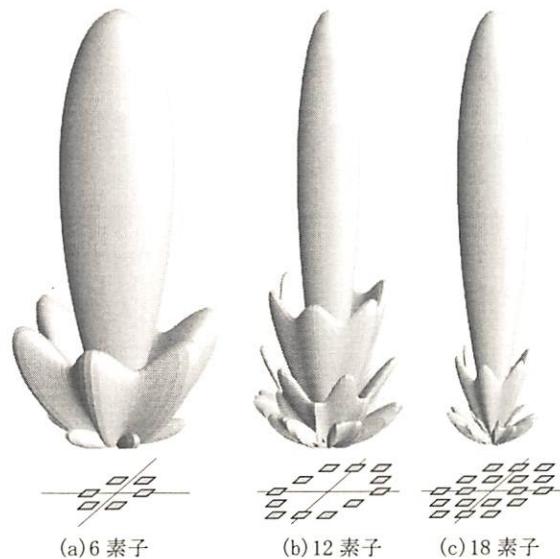


図 5 各リングアレイセンサの指向性パターンの計算値

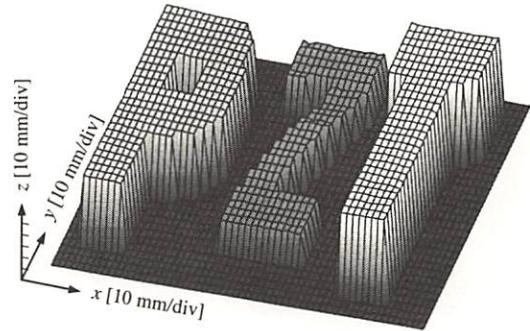


図 7 機械的走査による三次元形状計測結果

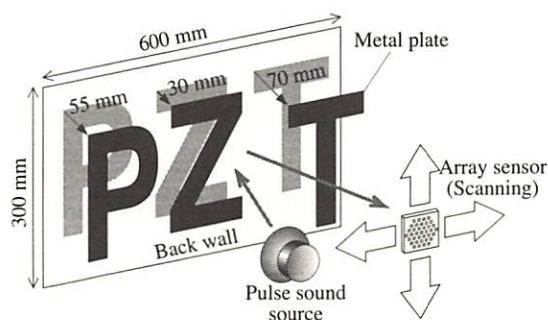


図 6 センサの機械的走査による三次元形状計測系

4. 機械的走査による三次元形状計測

図 3 に示したリングアレイセンサにおいて、各素子の信号を遅延時間無しで合成することにより、アレイ面に対して垂直方向に鋭い指向性を持たせることができる。リング状のアレイについて、6 素子の小リング、12 素子の大リング、18 素子の二重リングでの指向性パターンの計算値を図 5 に示す。リング直径が大きくなるほどメインローブが鋭くなり、また素子間隔が狭くなるほどサイドローブが押えられる。18 素子二重リングアレイでは、メインローブの半值幅が 26.6° 、サイドローブ比(最大のサイドローブとメインローブの強度比)が 22.5% である。

二重リングアレイセンサを用いて、機械的走査による三次元形状計測を試みた。これは、AFM (Atomic Force Microscope)などのプローブ顕微鏡のように探針を面内走査することにより対象物の形状を計測する方法に似て

いる。図 6 に測定系の模式図を示す。図 5 (c) の指向性を得るために、実際には各素子からの出力を並列に接続し、遅延無しで出力波形を合成することにより信号を得ることとした。この場合、センサ素子は 18 個であるが、合成後の信号に対するアンプ以下の処理系は 1 チャンネル分のみで良い。図 6 に示すように、“P”, “Z”, “T”の各文字の形に切り抜いた金属板を、壁の前にそれぞれ 55mm, 30mm, 70mm の距離を隔てて固定し、測定対象とした。超音波音源からパルス波を送信して対象物の反射波をアレイセンサで捉え、受信波形中で最初に閾値を越えた時刻から、反射体までの距離を算出する。このような送受信系を、壁面に平行(x-y 方向)に機械的に走査しながら送受信を繰り返し、各送受信点での反射体までの距離(z)をプロットすることにより対象物の三次元形状を再構成した。測定結果を図 7 に示す [4]。

受信波形中で最初に閾値を越えた時刻を以って反射点の位置としているため、文字型金属板の縁付近の位置では金属板と後ろの壁面の両方からの反射波が重畠されて出力されているにも関わらずどちらか一方のみの距離をプロットしている。そのため、文字の輪郭形状が一部崩れている部分が見られる。なお、機械スキャンのステップが 10mm 間隔と荒いため文字の丸みを持った形状が再現されていない部分もあるが、アレイセンサとしての指向性尖銳度からすると、かなり限界に近い解像度が得られている。一方、反射体までの距離は時間波形のピーク検出により求めるので、ノイズや反射波形の歪みの影響を受けるものの比較的精度良く求めることができる。本実験での距離分解能は約 5mm 程度である。各文字型金属板の壁からの距離の違いがよく読みとれる。

5. 電子走査による三次元計測

電子走査を行なうには、各素子からの出力を個別に増幅し、信号処理を行なわなければならないため、多チャネルの処理系を構築する必要がある。このために、3

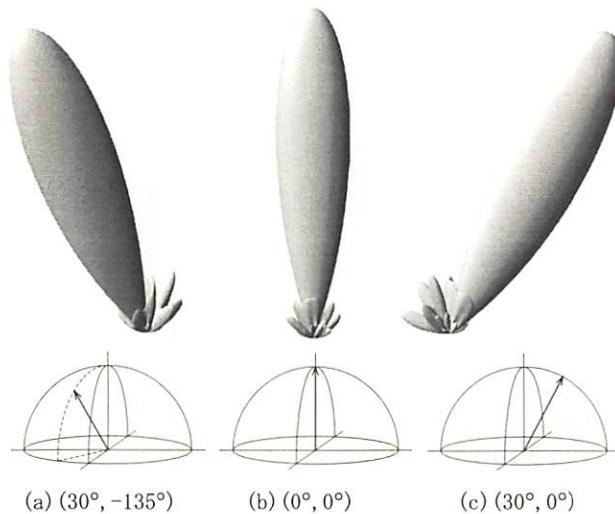


図8 電子走査した指向性パターンの計算値の例

枚のプリント基板からなる32チャンネル対応の小型の計測制御用の基板を作製した[5]。第1基板はセンサチップと初段および第2段増幅を行なうオペアンプ、第2基板は最終段のオペアンプ(Maxim Integrated Product社のMAX4234を合計24個使用)とA/Dコンバータ(Analog Devices社AD7478を32個使用)を配置しており、第3基板はHuMANDATA社のFPGA基板EP1C12Q240C8で、Altera社のCycloneを搭載している。これらの基板は全てクレジットカードサイズ(85mm×55mm)であり、シールドケース内に収容すると、全体で約250ccの体積を要する。この処理系を用いて、アレイチップ上で31素子を選んで二次元アレイを構成し、三次元計測を行なった。

多数の素子によりアレイを構成する場合、前述の遅延加算処理における各素子の出力信号の周波数が問題となる。各素子の共振周波数が不揃いであると、遅延加算後の信号に不要な干渉によるうなりが生じ、反射波の到着時刻を捉えることができなくなる。これまでに、この問題を克服するためにハードウェアとしてのセンサそのものをチューニングする方法[6]を開発しているが、今回は信号処理により共振周波数差を吸収する方法[7]を採用している。

電子走査による計測は、指向性メインロープの方向を傾けることにより特定角度方向の情報を得ることに相当する。例として走査角度 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ), (30^\circ, 0^\circ), (30^\circ, -135^\circ)$ におけるアレイの指向性パターンの計算値を図8に示す。正面におけるメインロープの半値幅は約 20° である。走査することによりメインロープは多少広がるが、各方向とも走査角度 $\pm 45^\circ$ 以内であれば半値幅は 22° 以内に収まる。サイドロープ比は正面において約17%であり、これも走査により多少大きくなるが $\pm 45^\circ$ 以

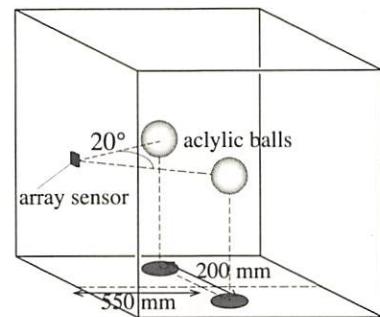


図9 三次元物体位置計測系の模式図

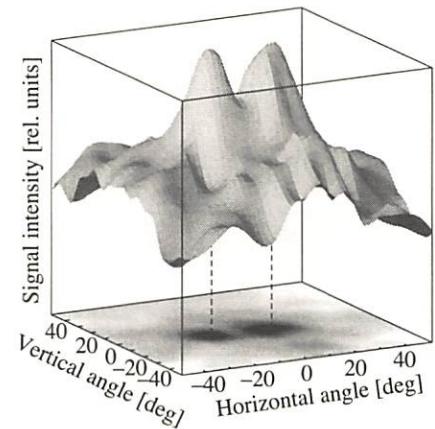


図10 電子走査による三次元物体位置計測結果の例

内の走査角度であればサイドロープ比は最大25%以内である。このアレイセンサを用いて、図9に示す測定系で三次元物体位置計測を試みた。対象としてはアクリル製のボールを用いた。球形の反射体は近似的に点反射体とみなせるので、分解能等の評価に都合が良い。二個のボールをセンサの前方550mmの位置に200mmの間隔を空けて固定し、一発の超音波の送受信により得られた波形から電子走査により反射体の三次元中での位置を計測した。計測結果を図10に示す[5]。これは遅延加算による電子走査後の波形のピーク値を各走査角度毎にプロットしたもので、反射体の存在する方向を中心にして、アレイのメインロープに相当する広がりを持って分布している。これらピークの方向(仰角および方位角)が物体が存在する方向であり、この走査角度における波形のピークの到達時間から物体までの距離を求める。これにより

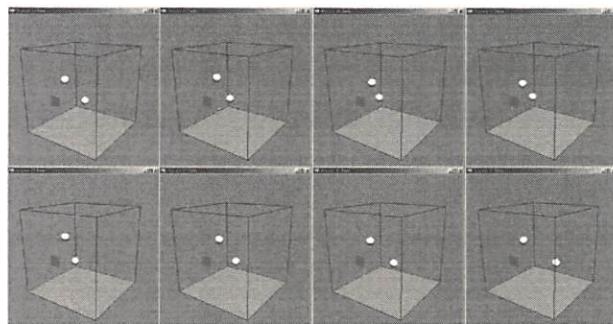


図 11 リアルタイム三次元計測表示のスナップショット

三次元中での物体の位置を確定する。

一発の超音波パルス送受信により三次元情報を得ることができるので、連続的に送受信を繰り返すことによりリアルタイムに物体の動きを捉えることができる。図 11 にリアルタイム計測表示画面のスナップショットを示す [8]。図 9 と同様な配置で、天井から吊した二個のボールのうち左側の一個を固定、右側の一個を左右に振り子運動させている。外枠として立方体状に描かれている領域が、一辺 1m の測定領域である。本測定では超音波の往復時間は約 3ms であり、図 11 での各コマ間の時間は、音源のパルス繰り返し速度で律速されている。移動物体のリアルタイム測定には十分な速度が得られている。

6.まとめ

空中超音波用マイクロアレイセンサとこれを用いた三次測定系について紹介した。18 素子のリングアレイセンサの機械走査により三次元形状測定を行なった。電子走査測定系では、三十余りの素子からなるアレイを用いた測定系を構成して、リアルタイムで三次元の物体位置計測が可能となった。今後信号処理系の改良を含めて、身体の姿勢の検知等が可能な形を感じるシステムとしてゆきたい。

参考文献

- [1] 超音波便覧編集委員会編：超音波便覧、丸善(1999)
- [2] K. Yamashita and M. Okuyama: Sensitivity Improvement of Diaphragm Type Ultrasonic Sensors by Complementary Piezoelectric Polarization, *Sens. and Act. A: Phys.*, 127, pp.119-122 (2006)
- [3] K. Yamashita, H. Nishimoto and M. Okuyama: Diaphragm deflection control of piezoelectric ultrasonic microsensors for sensitivity improvement, *Sens. and Act. A: Phys.*, 139, pp.118-123 (2007)
- [4] K. Yamashita, H. Katata, M. Okuyama, H. Miyoshi, G. Kato, S. Aoyagi and Y. Suzuki: Arrayed ultrasonic microsensors with high directivity for in-air use using PZT thin film on silicon diaphragm, *Sens. and Act. A: Phys.* 97-98, pp.302-307 (2002)
- [5] 山下 馨, 大村勇樹, 岩橋啓介, 奥山雅則: 共振周波数の異なる超音波マイクロセンサによるフェイズドアレイを用いた物体位置計測, 平成 19 年電気学会 E 部門総合研究会, PHS-07-17, 筑波, 7/2-3, pp.17-22 (2007)
- [6] K. Yamashita, L. Chansomphou, H. Murakami and M. Okuyama: Ultrasonic Micro Array Sensors Using Piezoelectric Thin Films and Resonant Frequency Tuning, *Sens. and Act. A: Phys.* 114, pp.147-153 (2004)
- [7] K. Yamashita, K. Iwahashi, Y. Ohmura and M. Okuyama: Ultrasonic position measurement using phased array microsensors with resonant frequency variation, *Transducers '07*, Lyon, France, June 10-14, pp.1271-1274 (2007)
- [8] 山下 馨: 三次元計測用マイクロ超音波アレイセンサとその空間認識システムへの応用, 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構平成 15 年度採択産業技術研究助成事業 03A19001d 研究成果報告書(最終) (2006)

【略歴】

山下 馨 (YAMASHITA Kaoru)

大阪大学 大学院基礎工学研究科 助教

1990 年大阪大学基礎工学部卒業, 1992 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了, 1994 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程中途退学, 2002 年博士(工学)。1994 年大阪大学基礎工学部助手, 1996 年大阪大学大学院基礎工学研究科助手, 2007 年より現職。専門は、強誘電体・圧電体・ポリマー等機能性薄膜とシリコンマイクロ構造体を組み合わせたセンサ・アクチュエータデバイスの作製・評価およびその信号処理系の開発とシステム化。電気学会センサ・マイクロマシン部門役員, 応用物理学会正員, 日本 ME 学会正員, センシング技術応用研究会幹事。

奥山雅則 (OKUYAMA Masanori)

大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授 副研究科長

1973 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程電気工学分野修了。1973 年日本学術振興会奨励研究員, 1974 年 4 月大阪大学基礎工学部電気工学科助手, 1991 年大阪大学基礎工学部電気工学科教授, 1997 年より現職。専門は、強誘電体・誘電体薄膜の作製評価と電子デバイス・センサへの応用。電気学会センサ・マイクロマシン部門長, 応用物理学会理事, センシング技術応用研究会会長, 次世代センサ協議会理事。

特集 ■ VRとMEMS技術

ヒトのように触れる



篠田裕之

東京大学

SHINODA HIROYUKI

1.はじめに

ここ数年、触覚の研究者は急増してきている。この傾向をうけて2005年から世界の触覚研究者が集まるWorld Hapticsの開催が始まった。国内のロボットやセンシングに関係する学会においても、触覚のオーガナイズドセッションは投稿論文数が多く、会場は大変活気がある。触覚に興味を持つのは大学の若手研究者だけではない。大手から中小までかなりの数の企業が今後の研究開発のターゲットとして触覚に注目している。現在は実用開発の一歩手前で慎重にアプリケーションを探している段階であるが、将来的な可能性に対する期待は非常に大きい。

触覚センシング技術に対するニーズは、時代とともに変化してきている。おもに2000年までの流れについては文献[1]を参考にしていくこととし、本稿では特に最近の開発動向、研究課題について述べていくこととする。触覚という言葉には皮膚に分布する受容器で検出される情報(皮膚感覚)と、筋肉が発生する力の情報(力覚)の両方が含まれる。ここでは特に皮膚感覚に焦点をあて、そのハードウェアの技術とMEMS技術の関係について解説する。

2.研究開発の三つの方向性

人間の触覚に関連するセンシング技術には現在少なくとも三つの方向性があり、それぞれに開発すべき内容と優先順位が異なっているように思われる。1番目のターゲットはロボットの全身触覚である。この開発における目標は、実用的な丈夫さを持ち柔らかく自由曲面を覆うことができるデバイスを開発することである。当面の目的において皮膚の一点でのセンシング能力はそれほど高くなくてもよい。まずは全身にくまなく触覚を実装できることが必要であり、センシングの解像度や能力(その内容は後述する)はその後で除々に高めていけば

よいというのが研究開発の基本姿勢となる。本稿では仮にこれを「全身型皮膚センサ」と呼ぶ。

2番目の方向性は、VRにおける触感を忠実に計測できるセンサを実現することである。多くのVR研究者は触覚まで忠実に再現したいと望んでいるが、そのためにはまず皮膚が対象物に触れたときの触感をデータ化するセンサが必要になる。この目的において最も重要なのは、ヒトが取得しているのと同等な触覚情報を知覚するセンサを実現することである。その目的が達せられればそのセンサがロボットの表面に容易に実装できるものでなくとも当面は問題ではない。全身のような広い面積ではなく、まずは体の一部(できれば指先)を代替するものが実現されれば十分である。このような目的のセンサを仮に「触感センサ」と呼ぶ。触感センサは、VRだけでなく工業製品の表面の触感を量化し、触感という面から製品の品質向上を目指す上でも注目される技術領域である。医師の触診の自動化も、触感センサの応用分野となるであろう。

第3の用途は自動作業するハンドの指先のセンサである。ロボット工学と同時に始まった触覚センサの最初の目標は、自動作業をするロボットの指先に取り付けて物体把持の状態を計測することであった。このような目的のセンサをここでは「マニピュレータ触覚センサ」と呼ぶこととする。1980年代に想定された触覚応用の本命は、ロボットハンドで物体を巧みに把持することであったが、これまでマニピュレータ触覚センサがロボットの指に取り付けられて活用される場面は皆無であった。このあたりの事情については文献[1]に記されている。しかし最近は完成度の高い触覚センサの開発例も見られるようになっており[3]、また触覚情報を用いた高速マニピュレーションなども実現されるようになってきた[4]。この応用にとって、触感検出の能力が必ずしも人間のそれと同じ特性を持つ必要はない。指の表面における力分

布がベクトルとして正確に計測できることが重要で、その精度、時間応答はむしろ人間の能力を超えたものになることが望ましい。

以上の三つの方向性におけるアプリケーション領域は異なっており、技術開発の力点や実現されるデバイスの形態もそれ自体異なる。しかしそれらの根底にある問題の多くは共通であり、触覚関連技術が実用化されて技術が成熟した後は結局一つのデバイスに収束していくようと思われる。すなわち人間の皮膚のように薄く柔らかく自由な形に成型でき、かつ人間の皮膚のような触感を得ることができるようにシートが、VR をはじめ様々な領域で活用されていると考えられる。本稿ではその共通問題を整理し、最終形態にいたるまでの開発の道筋を展望する。

なお、前述の三つの方向性に加えて近年重要性を増してきている研究領域として、コンピュータインタフェースのための接触センシング技術が挙げられる。人間の皮膚と環境との相互作用を計測することで、現在のタッチパネルや携帯電話のボタン以上に便利でわかりやすいインターフェースを実現しようという目的である。この場合は、人間の触覚と同じような感覚を検出できるセンサを作ることが第一目的ではない。どのようなインターフェースが使いやすいか、という全体システムの構想と、どのような情報がセンシングできるかという要素技術の知見が同時に勘案され、開発が進められることになる。これに関する研究についても後ほど言及する。

また、対象表面の硬さなど何らかの機械特性を計測するセンサを触覚センサに含めて考える場合もある。人間の肌や生体組織などの弾性的性質を計測するセンサがいくつかのアプローチで研究されている[5-7]。内視鏡手術において微細なマニピュレータ先端に取り付けられる小型触覚センサも興味深い応用分野であるが[29]、ここでは深くは立ち入らない。

3. 「完全触覚」センサ

前述のように、三つの目的にむけて触覚センサを開発するときの最初の一歩はそれぞれ異なるが、人間の触覚の本質について一定の知識を持って開発に取り組むことは有益である。例えば表面での接触の有無だけを検出する大面積の柔軟センサが実現されたとすると、すぐに次のテーマとしてせん断力と垂直力を見分けたり、テクスチャや滑りなどまで検出したくなるであろう。このとき最初に選んだ方法がこれらの検出のための拡張性を持たないものであれば、最初から開発をやり直さなければならない。そこでまず、人間の皮膚と同等な能力をもつ皮膚センサに求められる条件を考察してみる。まず人間の触覚が得ている情報を言葉で列挙すると以下のようなになる[1,2]。

- ・接触の場所、力とその方向
 - ・滑りと滑りの予知(滑りそうかどうか), 摩擦
 - ・面の3次元曲率、鋭い先端の知覚
 - ・硬さ、柔らかさ
 - ・粘性、ねとねど、ぬるぬる
 - ・テクスチャ、布や毛皮などの微細な構造
 - ・温度、熱伝導度、かゆみなど機械的刺激以外のもの
- さて、人間が得ているこれらの情報を完全にカバーするにはどのような仕様の触覚センサを実現すれば必要十分であろうか。後述するように「必要十分条件」を明示するのはそれほど簡単ではないが、十分条件はある程度の確度をもって述べることができる。それは以下のようないくつかのアプローチで皮膚表面での応力分布を計測するセンサがあり、仮にこれを「完全触覚センサ」と呼ぶこととする(ここで機械刺激の知覚に限定する)。

＜完全触覚センサ＞

- (1) 皮膚表面でのサンプリング間隔は 1 mm 以下
- (2) 各計測点において力の3次元ベクトルが計測される
- (3) サンプリング周波数は 1 kHz 以上
- (4) 計測精度は 16 bit 以上
- (5) センサの弾性的性質が皮膚と同等であること
- (6) センサ表面の摩擦特性が皮膚と同等であること

上記(1)は指先触覚受容器の配置密度を根拠にしている。そもそも弾性体のローパスフィルタ特性によって、それ以上に細かい空間周波数成分は受容器の存在する深さまで到達することができない[2]。ただし(1)の項目は、人間が 1 mm より細かいパターンの違いを見分けられないと言っているわけではない。人間はミクロンオーダーの表面凹凸形状が変化すればその違いを触感の違いとして検出することができる。ただしそれは表面凹凸の詳細な写真を撮ることとは事情がかなり異なっている。対象物体に触れて指を滑らせると、対象物体の凸部と指紋の凸部の間で不規則に固着と滑りが繰り返される。その結果、表面凹凸の空間周波数は高いものであったとしても、皮膚表面には低い空間周波数を持つ振動成分も同時に発生する。ヒトの触覚はこの成分の違いによって触感の違いを識別しているということである。

上記(3)は触覚受容器感度の周波数特性に基づいている。人間の触覚は 1 kHz 以上の振動成分にも感度があると言われており、厳密にはこの倍以上のサンプリング周波数が必要になるが、ここでは目安としての値を示している。(4)は人間の皮膚を単純なバネと仮定した上で、皮膚の変位を 0.1 μm[8] から数 mm 程度まで知覚できることを根拠にしている。

項目(5), (6)はきわめて重要な要件である。触感は指

が対象物に触れ、相互が変形することではじめて生じる感覚である。例えば人間の指より硬いものに触れれば指だけが変形して対象物は変形しない。逆に指の方が硬ければ対象物の方が変形する。人間はこのような現象を利用して対象物の硬さを識別していると考えられるが、センサ指の硬さが実際と違うのであればこのような判別が行えなくなる。そもそも指が硬い材料でできていると、硬い対象物体とは点でしか接触することができなくなり、ヒトが物体を持続している場合とは異なる状況で物体に触れていることになる。

4. 完全触覚センサは過剰性能

もし完全触覚センサがすでに実現されていれば、触覚技術は多くの場面で実用されているであろう。しかし完全触覚センサのハードルは低くない。やっかいなことにこれらのスペックのうちいくつかを緩和すると触覚センサとして役に立たないものになってしまい、なかなか実用化に結びつかない。

前記6項目のうち、これまで問題を難しくしていた主犯格は(5)であったと思われる。板状あるいはフィルム程度までの硬さの基板の上であれば1mm程度の間隔でセンサを並べることはすでに実現できていると言つてよい[9]。ただしこのような材料では(5)の要件を満たさないために触覚のセンサとして適用対象はきわめて限定されたものとなる。フィルムは一方向に曲げることはできるが、指先形状にしてしまうともはや変形できない。表面にゴムのカバーをすればやわらかくなるが、センサがゴムの奥にあると、細かい分布はセンサまで届いてくれない。

条件(5)を含む全ての項目を満たすことは現時点で難問であるが、これら全ての条件を満たすことは明らかに過剰性能である。人間が皮膚から取得している情報はこれよりはるかに少ない。どのようにオーバースペックであるのか、それにもかかわらずどうして単純にスペックを緩和できないのか、を以下簡単に説明する。

＜空間分解能 --- 前腕部触覚センサを作るには＞

指先などの一部の部位を除き、人間の皮膚の二点弁別閾はそれほど大きくない。二点弁別閾とは2点を同時に触れた時、それが2点であると判別できる最小距離のことであり、指先でこそ2~3mmと言われているが、手のひらで1cm弱、前腕部では4cm程度の人もいるとされている。前腕部であっても指先と同じように布地やその他の触感を見分けることができることを考えると(少なくとも我々はそのように思いこんでいる)、前腕部の触覚を忠実に模倣するセンサがあれば触覚センサとしても有用と思われる。

では、例えば1辺が3.5cm角の力センサを配列すれば前腕部の触感センサになるであろうか。そうならないことは明白である。前腕部であってもボールペンのペン先と丸いキャップは容易に見分けることができるが、1辺3.5cmの力センサではこれらを見分けることができない。ボールペンを横に移動したとき、人間はそれを容易に認識できるが、前述のセンサではその横ずれ量が3.5cmを超えるまでそのことを認識できない。したがって、触感センサを作りたいのであれば、単純に力センサアレイの解像度を粗くしてしまうことは許されない。

しかし人間と同様な情報を獲得するための方法は、センサアレイの要素を細かくする以外にも存在し、おそらく人間もそのようなセンシングを行っていると思われる。例えば接触物体の接触面積の検出は、前述の3.5cm角の触覚ユニットごとに(ユニット内表面の応力分布に対して)異なった非線形応答特性を持つ2層の触覚素子を備えることで可能になることが示されている[10]。つまりセンサアレイの1ユニット分の出力として最低2自由度あれば、皮膚に接触しているものが鋭利な物体であるか滑らかな物体であるかの識別は可能である。また各ユニットの感度がなめらかに変化し、となりあう素子と適当にオーバーラップしていれば、(となりあう素子の出力比の変化を観察することによって)接触力の重心の移動をユニット長以下の分解能で検出することもできる。

＜計測精度＞

皮膚の無毛部には4種類の受容器があると言われており、そのうちの3種類の存在についてはほぼ定説となっている。実は各受容器が識別している信号強度の段階数は16bitよりもはるかに小さいと考えられている。確かにヒトは200Hzの微小振幅振動を認識すると同時に、1mmと3mmの変形の違いも識別できる。しかもあらかじめ3mm変形した上で微小振動した場合でもそれを認識することができるから、单一のセンサでこのような識別を行うためには単純計算で十数ビットの分解能が必要になる。

人間の場合には異なる周波数特性を持つ複数の受容器がうめこまれている。パチニ小体はその物理構造をうまく利用し、200Hzで指先の広い面が振動する場合について0.1μmの表面変位を検出できる(変位が局所的である場合、知覚可能な最小変位はもっと大きい)。しかし静的な変形には感度がなく、逆に微小振動と同時に静的な大変形が与えられても振動検出の感度が鈍ることはない。これによって物体をかたく握りしめながら微小な振動を検出できる。このように人間の触覚は、特性の異なる複数種類の受容器を用いてゆっくりとした大変形

と微小振幅振動を同時計測している。特性の異なる受容器の反応を組み合わせて特徴抽出しているのであって、正直に 16 bit もの分解能を持っているわけではない。

5. 触覚センサの取り組みと MEMS 技術

上述のように、人間の触覚は完全触覚センサほどの情報量を取得していないことは多くの研究者によって信じられている。しかし、情報量がはるかに少ないからといって、人工的なセンサとして作り易いとは限らない。完全触覚センサは過剰な素子数を必要とするが、それらの仕様は明確でしかも均質でよい。むしろうまい作り方を見できれば工学的にはそちらの方が作製しやすい可能性もある。したがって本稿では完全触覚センサを当面の目標仕様として、前記三つの方向性について開発の現状と問題点を整理してみる。

〈1〉 全身型皮膚センサ

大面積センサとしても古くから研究されているのは感圧導電性ゴムを用いた手法である [30]。そのようなデバイスを曲面に実装する手法 [11] も近年提案されている。最近は、人間型ロボットの表面に 1,000 素子をこえる規模のセンサを実装した例が報告されはじめている。研究 [12]においては光学式のセンシング手法を上手に使い、電気信号を伝送する部分と柔軟皮膚の部分を分離した。また計測と信号伝送用の回路を分散させ、自由な形状の領域にセンサが配置できるようにすることで実装が可能になった。なお局所的な読み取り回路を皮膚の背面に配置し、それとは分離された皮膚の変形を計測するセンシング手法は、テレメトリックスキンとして [13]において導入されている。このような考え方を発展させて知覚情報をさらに高度化していくには、表面の皮膚に新たな構造を持ち込んで皮膚背面から多自由度の変形量を計測できるようにするか、あるいは無配線で信号を読み出せる微小な変形センサを分散させることが考えられる。そこに MEMS 触覚素子 [14-16]、特に(近接)無線通信回路 [17] を一体化した触覚素子が必要となる。研究 [18]においては、皮膚背面に読み取り回路を設置するのではなく、柔軟体皮膚の内部を伝播するマイクロ波によってセンサ情報を読み取る方式が提案されている。この方式が実現されれば皮膚の実装はさらに簡単になる。ここで埋め込まれる触覚素子においても、通信インターフェースを備えた MEMS 触覚素子が期待される。

〈2〉 触感センサ

触覚の受容器が物理レベルでどのような情報を取得しているかについては [19], [20] 等の研究によってかなり明らかになってきた。また、[21] では皮膚の機械的

特性や、表面の摩擦特性を考慮した人工皮膚の検討が行われている。複雑な知覚機構を経て認識されていると思われていた触感が、ごく簡単な構造の触覚ディスプレイで表示される実例なども見出されており、触感知覚のメカニズムに関する基礎研究は着実に進展している [31]。しかし VR における触感センサについては、本格的な実用化まで課題山積と感じる研究者は多いであろう。その理由はデバイスに求められる合格水準が非常に高いことによる。日本で最初にブラウン管テレビを実証した実験は「イ」の字をディスプレイに表示するというものであった。このとき表示された画面は近年の VR に用いられているような高精細な映像とは程遠いものであったが、人々はその有用性をただちに理解することができた。エジソンやベルが電話を発明したときも、その音質は現在の高品質音響と比べればきわめて質の低いものであったが、その中に認識可能な言葉や音楽を聞き取ることができたことで、人々はそれを十分リアルなものだと感じた。

これをそのまま触感の伝送に置き換えてみると、デバイスに課せられるハードルはこれよりずっと高いことがわかる。表面のおおまかな形状をセンサで計測し、ピンを配列したディスプレイで提示する、というシステムはすでに試作されているが、これだけではその適用場面がなかなか見つからない。本物と見分けがつかないような毛皮の触感が合成されるのであれば、インターネットでの買い物にただちに応用できるが、実際にそのような応用が可能になるためにはきわめて高いアリティが要求される。そしてそのようなアリティで皮膚に多様な触感を提示する装置が存在しない現段階においては、有用な触感センサとはどのような情報を得るセンサであるかも(一部を除いて)明確にはなっていない。

しかしそれだけに基礎研究としては可能性が大きく魅力的な研究領域である。なお特定の製品の品質管理を目的とし、一部の触感因子を定量化するセンサについては、製造現場に近いレベルでの開発も始まりつつある。

〈3〉 マニピュレータ触覚センサ

近年提案された [3] はこれまでにない完成度を持った光学式のセンサである。弾性体表面付近の微小マーカの移動を指に埋め込まれたカメラで撮影し、その変形分布から表面の応力を計算する。小型の高精細撮像素子が安価に入手できるようになったこと、その後のパターン処理もリアルタイムで行えるよう周辺技術が進歩したことから、実用的なセンサが実現できるようになった。現在は皮膚の一面をカメラで撮影するため指先全体がセンサになっているが、これを既存のフィンガの表面に実装できるようになるとさらに幅広い応用

が可能になると考えられる。また研究[4]のグループは、触覚フィードバックによる高速な「ペン回し」と「ひも結び」を実現している。垂直力とその重心位置の計測値をもとに、リンクの範囲内から対象が外れないように把持制御を行っている。

〈補足〉ヒューマンインタフェース用触覚センサ

コンピュータインタフェースのための触覚センシング技術について面白い発想のものが提案されているのでここで言及しておく。文献[22]の爪装着型センサは、指先が対象物に触れたことを爪の色の変化から読み取るセンサであり、指と物体との接触面にデバイスを装着することなく指先力を検出できることが特徴である。研究[23]は指先に装着した光学アレイセンサで表面の模様を読みとりそれを電気触覚ディスプレイで指先に提示するというもので、人間の触覚の能力を拡張する面白い試みである。指先の振動を指の付け根やその他の部位で読み取るセンサをヒューマンインタフェースとして利用する試みも[24], [25]に報告されている。また触覚そのものではないが、前腕部の筋電分布を計測する柔軟ソータ状デバイス[26]は、手に何も装着しないまま指先の力を検出する新しいインタフェースの提案であるが、このような応用においても通信回路とセンサが一体となったMEMSチップが必要とされている。

6. MEMSを皮膚に展開する二次元通信技術

これまであげてきた触覚センサが、万能とも言える人工皮膚デバイスに収束していくためには、柔軟体に高密度の微小素子を実装する新しい基礎技術の開発が必要である。一つの考え方が、機能素子を含めた回路要素を生物同様に柔軟な素材で実現することである。有機トランジスタの回路を印刷技術で実現する研究が進められている[27]。今後物性、機械的特性両面での耐久性が実用レベルに達すれば、皮膚デバイスとしても期待がふくらむ。これと並行するもう一つの考え方が、センシングと近接通信の機能を微細なシリコン素子内部に集積し、それらを配線工程なく柔軟素材に実装するというものである。著者らが現在開発を進めている二次元通信[28]は、そのような実装を実現する技術であり、最後に概略を紹介させていただく。

二次元通信とは、その名の通り薄い二次元シート内を伝搬する電磁波で通信する技術である。通信シートの表面に近接したコネクタは、通信シートに低損失で電磁波を送出するとともにシートからエネルギーを吸収する。現在はおもに卓上・室内規模で情報機器やセンサを結合するマイクロ波帯での技術開発が進行している。普段は電磁波がシート内部に閉じ込められていることから機器を

動作する電力も安全に伝送することができる。

この技術は皮膚のような大面積柔軟素材に多数のMEMSを集積、実装するのに有効な技術であると考えられる[18]。センサ素子と2層の導電層からなる通信層の間に電気的な接続は不要であり、センサ素子は通信層に沿って横ずれすることも許容される。通信媒体として導電纖維を用いた場合、特定の纖維に素子を接続してしまうと、シート全体の柔軟性が損なわれる上にその部分が破断しやすくなる、マイクロ波による近接結合ではこの問題が回避される。なお二次元通信層内においては、電磁波長よりも著しく小さいコネクタによって良好な近接結合が確立できる。現在は二次元通信のプロトコルを実装した通信回路開発の段階であるが、近い将来これがMEMS技術と結合され、やわらかい人工皮膚が実現されるよう、日々努力しているところである。

参考文献

- [1] 篠田裕之：器用な手の皮膚と触覚、日本ロボット学会誌、Vol.18, No.6, pp.767-771 (2000)
- [2] 篠田裕之：皮膚の力学的構造に隠れている知能、システム制御情報学会誌、Vol.46, No.1, pp.28-34 (2002)
- [3] K. Kamiyama, K. Vlack, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi: Vision-Based Sensor for Real-Time Measuring of Surface Traction Fields, IEEE Computer Graphics & Applications Magazine, Jan-Feb, Jan-Feb, pp. 68-75 (2005)
- [4] T. Ishihara, A. Namiki, M. Ishikawa, M. Shimojo: Dynamic Pen Spinning Using a High-speed Multifingered Hand with High-speed Tactile Sensor, Proc. 2006 IEEE RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.258-263 (2006)
- [5] T. Shiina, Y. Murayama, Y. Hatakeyama, S. Takenoshita, S. Omata: Development of a breast cancer checker using a tactile array sensor and a tactile display system, Proc. of the 22nd Sensor Symposium, pp.402-405 (2005)
- [6] 田中信行, 金子真：ひきつれ効果に着目したヒト肌の動特性評価、計測自動制御学会論文集、Vol. 43, No. 4, pp. 256-263 (2007)
- [7] M. Shikida, T. Shimizu, K. Sato, and K. Itoigawa: Active tactile sensor for detecting contact force and hardness of an object, Sensors & Actuators: A103, pp. 213-218 (2003)
- [8] S. J. Bolanowski, Jr. et al.: Four Channels Mediate the Mechanical Aspects of Touch; J. Acoust. Soc. Am, Vol.84, No.5, pp.1680-1694 (1988)
- [9] <http://www.tekscan.com/>
- [10] 星貴之, 篠田裕之：接触力と接触面積を計測する非線形触覚素子、計測自動制御学会論文集、Vol. 42, No. 7, pp. 727-735 (2006)
- [11] M. Shimojo: Development of tactile sensors using liquid

- type pressure sensitive material, 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation (2004)
- [12] Y. Ohmura, Y. Kuniyoshi, and A. Nagakubo: Conformable and Scalable Tactile Sensor Skin for Curved Surfaces, Proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May, pp. 1348-1353 (2006)
- [13] M. Hakozaki, H. Oasa and H. Shinoda: Telemetric Robot Skin, Proc. 1999 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 957-961 (1999)
- [14] M. Sohgawa, M. Noda, Y. M. Huang, K. Yamashita, T. Kanashima, M. Okuyama, and H. Noma: Studies on Deflection Control of Bilayer Cantilever Fabricated by Surface Micromachining Process on SOI Wafer, Proc. of the 23rd Sensor symposium, pp.165-168 (2006)
- [15] K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto, I. Shimoyama: A Shear Stress Sensor for Tactile Sensing with the Piezoresistive Cantilever Standing in Elastic Material, Sensors and Actuators A, vol. 127, no. 2, pp. 295-301 (2006)
- [16] H. Takao, K. Sawada, and M. Ishida: Integrated Silicon-MEMS Multifunctional Tactile Image-Sensor Aimed at Realization of Artificial Fingertip Tactile Sense, Proc. of the 22nd Sensor symposium, pp.380-383 (2005)
- [17] S. Sasaki, T. Seki and S. Sugiyama: Batteryless Accelerometer Using Power Feeding System of RFID, Proc. of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp.3567-3570 (2006)
- [18] H. Chigusa, Y. Makino, and H. Shinoda: Large Area Sensor Skin Based on Two-Dimensional Signal Transmission Technology, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 151-156 (2007)
- [19] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿: ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係; 日本機械学会論文集C編, 63巻, 607号, pp.881-888 (1997)
- [20] K. Dandekar, B. I. Raju and M. A. Srinivasan: 3-D Finite-Element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense, Transactions of the ASME, Vol. 125, pp. 682-691 (2003)
- [21] 白土寛和, 野々村美宗, 前野隆司: 肌質感を呈する人工皮膚の開発(皮膚の表面凹凸パターンと弾性構造の模倣に基づく肌質感の実現と評価), 日本機械学会論文集 73巻 726号 C編, pp. 541-546 (2007)
- [22] S. Mascaro, and H. Asada: Measurement of Finger Posture and Three-Axis Fingertip Touch Force Using Fingernail Sensors, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 1, pp. 26-35 (2004)
- [23] H. Kajimoto, M. Inami, N. Kawakami, and S. Tachi: SmartTouch - Augmentation of Skin Sensation with Electrocutaneous Display, Proc. 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 40-46 (2003)
- [24] M. Fukumoto, and Y. Tonomura: Whisper: A Wristwatch Style Wearable Handset, Proc. CHI '99, pp.112-119 (1999)
- [25] T. Iwamoto and H. Shinoda: Finger Ring Tactile Interface Based on Propagating Elastic Waves on Human Fingers, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 145-150 (2007)
- [26] Y. Makino and H. Shinoda: Comfortable Wristband Interface Measuring Myoelectric Pattern, Proc. World Haptics 2007, Mar., Tsukuba, Japan, pp. 433-438 (2007)
- [27] H. Kawaguchi, T. Someya, T. Sekitani, and T. Sakurai: Cut-and-Paste Customization of Organic FET Integrated Circuit and Its Application to Electronic Artificial Skin, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 40, No. 1, pp.177- 185 (2005)
- [28] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai: Surface Sensor Network Using Inductive Signal Transmission Layer, Proc. Fourth International Conference on Networked Sensing System (INSS07), pp. 201-206 (2007)
- [29] B. L. Gray and R. S. Fearing: A Surface Micromachined Microtactile Sensor Array, Proc. of the 1996 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1-6 (1996)
- [30] 下条誠, 石川正俊: 薄型フレキシブル位置覚センサとその応用, 計測自動制御学会論文集, Vol.21, No.11, pp. 1250-1252 (1985)
- [31] 白土寛和, 前野隆司, 触感呈示・検出のための材質認識機構のモデル化: 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.9, No.3, pp. 235-240 (2004)

【略歴】

篠田裕之 (SHINODA Hiroyuki)

東京大学 大学院情報理工学系研究科 准教授

1988 年東京大学工学部物理工学科卒業, 1990 年同大学院計数工学修士, 1990 年より同大学助手, 1995 年博士(工学). 同年より東京農工大学講師, 1997 年より同助教授, 1999 年 UC Berkeley 客員研究員, 2001 年より現職. 触覚を中心としたセンサシステムとデバイス, センサネットワーク, ヒューマンインタフェース, 光・音響・生体計測などの教育と研究に従事.

特集 ■ VRとMEMS技術

見えないものを見る



木股雅章

KIMATA MASAFUMI

立命館大学

1.はじめに

人間の目は、波長 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ の可視光域に感度を持っている。この波長域は、画像とし捉えることができる電磁波の中でも非常に限られた領域で、人間の目で見えない波長域にも、人間にとって役に立つ情報が豊富に含まれている。そのため、古くから人間の目で見ることができないものを観るための撮像デバイスの開発が行われてきて、既に、半導体を用いた固体イメージセンサの技術は、X線から波長 $10\mu\text{m}$ 付近の赤外線領域までカバーできるようになっている。こうした不可視光イメージセンサの中でも、赤外線イメージセンサは、暗視や温度計測に用いることができ、最も広い分野に利用できるデバイスと考えられている。赤外線イメージセンサには、冷却が必要な量子型赤外線検出器を用いたものと、MEMS技術により製造される熱型赤外線検出器を用いた非冷却赤外線イメージセンサがあるが、後者の室温動作という特徴を生かした新しい応用分野への進出が最近注目を集めている。

本解説では、赤外線イメージングの基礎、非冷却赤外線イメージセンサの動作原理とMEMS技術の役割、非冷却赤外線イメージセンサの現状と最近の開発動向について紹介する。

2.赤外線イメージングで見えるもの

人がものを観る場合、観る対象が反射している光を見ている。これに対し、本稿で紹介する波長 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 帯に感度を持った赤外線イメージセンサを用いたイメージングは、対象とする物体が放射している光を捉えるパッシブ・イメージングである。赤外線イメージングで、我々の身近にある物体の放射する光が検出できるのは、図1に示す分光放射特性により理解できる。この図は、黒体の温度の変化による分光放射特性の変化を示すグラフで、 300 K の室温付近の温度を持った黒体では、波長 $10\mu\text{m}$ 付近をピークとした赤外線領域に光を放射しており、この波長域の赤外線に感度のある

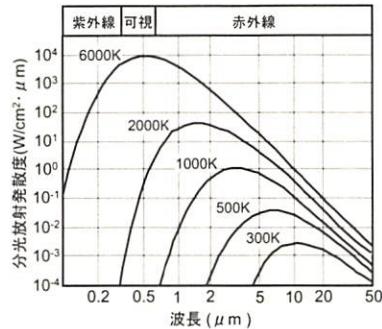


図1 黒体の分光放射特性

イメージセンサは、物体が放射する光で対象物を観ることができることが分かる。

可視光イメージングと比較した赤外線イメージングの特徴は、

- (1) 照明が不要(真っ暗闇でものが見える)
 - (2) 温度情報が得られる
 - (3) 煙や霧を透過しやすい
 - (4) 人と背景のコントラスト大(真夏の屋外を除く)
 - (5) 影ができるない(周りに高温のものがない場合)
- などが挙げられる。

以下、例を挙げて、これらの特徴の一部を説明する。

図2は(1)の特徴を示す夜間の画像で、左が可視光画像、右が赤外線画像である。可視光画像では、街頭の明かりと、その周りがわずかに確認できるだけであるが、同じ場所を写した赤外線画像では、フェンスに近付く不審者が鮮明に捉えられており、周囲の状況も十分確認できる。

図3は、紙の上にしばらく手を置いた(左)後、手を離して観察した紙の上の熱の残像を示す赤外線画像(右)の例で、紙の上に残ったわずかな温度分布を赤外線イメージセンサがしっかりと捉えていることが分かる。よく見ると、左の写真の手では、血管の分布の様子も確認できることが分かる。このような画像は、NETD(雑音等価温度差)が 0.1 K 前後の性能を持った赤外線イメージ



図 2 夜間の可視光画像（左）と赤外線画像（右）

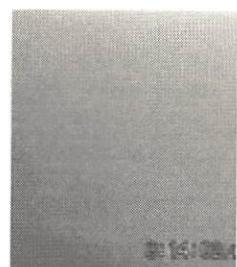


図 4 煙を通した可視光画像（左）と赤外線画像（右）

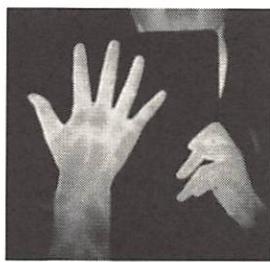


図 3 赤外線で視た熱の残像



図 5 温度差による内部状態の把握

センサで得ることができる。

図 4 は、特徴の(3)を説明する写真である。煙を充満させた室内で撮った人物像であるが、左側の可視光画像では何も見えない状態まで煙を濃くしても、右側の赤外線画像では、人が煙の無いときと同じように捉えられており、火事現場などの環境下での赤外線イメージングの優位性が理解できる。

図 5 は、タンカーを撮った画像であるが、石油が満たされた船倉と、空の船倉に温度差があるので、赤外線では可視光では分からず船倉内部の状態を把握することができる。

このような特徴を生かして、既に幅広い分野で赤外線イメージセンサの利用が進んでいる。図 6 は、赤外線イメージングの応用の一例であり、本稿のテーマで

ある非冷却赤外線イメージセンサの低成本化、高性能化が進展すれば、さらに応用分野が拡大するものと期待されている。

3. 赤外線検出メカニズムと MEMS の役割

赤外線検出器は、量子型と熱型に大別されるが本稿で対象としているのは、熱型赤外線検出器を集積化した非冷却赤外線イメージセンサである。“非冷却”的名称は、この種の赤外線センサが室温で動作することに由来しており、液体窒素温度付近まで冷却して動作させる必要がある量子型赤外線イメージセンサと区別するために使用される名称である。冷凍機を必要としない非冷却赤外線イメージセンサを搭載した赤外線カメラは、価格、サイズ、質量、消費電力、寿命の面で優れており、量子型赤

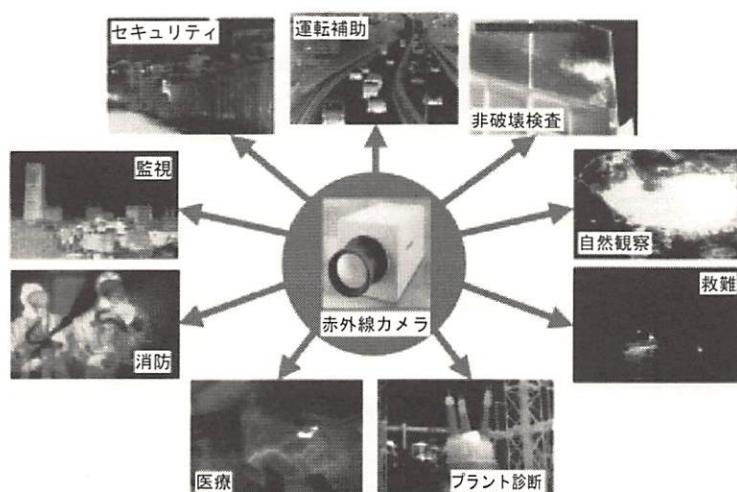


図 6 赤外線イメージングの応用

外線イメージセンサを用いた赤外線カメラの適用が不可能であった応用分野への適用が進んでいる。

図7に、熱型赤外線検出器の動作メカニズムを示す。熱型赤外線検出器は、赤外線を吸収することで変化した検出器の温度を温度センサで計測することで赤外線を検出する。図7で、赤外線吸収層と温度センサが、赤外線吸収により温度が変化する検出器構造になるが、この検出器構造は、支持構造により信号読出回路が形成された基板上に保持されている。赤外線エネルギーの吸収によってもたらされる検出器構造と基板間の温度差が大きいほど高感度となるが、この温度差は、支持構造の熱コンダクタンスに反比例するので、熱コンダクタンスを小さくすることで高感度にできる。

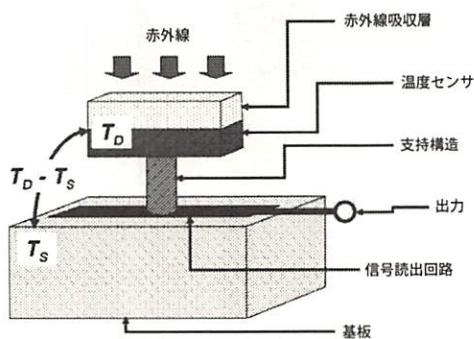


図7 热型赤外线検出器の構造

1990年代に入り、非冷却赤外線イメージセンサの性能が飛躍的に向上したが、この性能改善には、MEMS技術の利用による熱コンダクタンスの低減が大きく寄与している。図8は、熱コンダクタンスの低減がどのように感度改善に寄与したかを示す図である。この図より、非冷却赤外線イメージセンサの開発の中で、熱コンダクタンスの低減が感度改善に果たした役割の大きさを理解することができる。

図中のグラフは、横軸が熱コンダクタンスで、縦軸は、被写体温度が1°C変化したときの検出器構造の温度変化(感度に比例する値)を示しており、右下がりの直線は、画素サイズを50 μm角、開口率を100%、赤外線吸率を100%、光学系のF値を1、透過率を100%と仮定した場合の計算値である。グラフの上の図は、これまでに開発された非冷却赤外線イメージセンサの画素構造の模式図で、それぞれ構造が達成している性能を矢印で示した。図の右端の画素は、1980年以前から開発されていたもので、強誘電体検出器チップとシリコン信号読出回路チップ(図中のSi ROIC)を金属バンプで画素毎に接続した構造となっており、金属バンプの熱コンダクタンスが大きいため感度が非常に低かった。真ん中の画素は、金属バンプを用いたハイブリッド構造の改良版とし

て開発されたもので、金属バンプをシリコン信号読出回路チップ上に直接形成せず、熱伝導率の小さな有機メサ構造の上に載せることで熱コンダクタンスの低減を図っている。この構造の開発成功により、感度は2桁程度改善され、非冷却赤外線イメージセンサで実用レベルの性能が得られるようになった[1]。

一方、1980年代終盤から1990年代初頭にかけてMEMS技術が大きく進歩し、左端に示したような断熱された検出器構造をシリコン信号読出回路チップ上にモノリシックに集積化する技術が開発された。ハイブリッド技術では、熱コンダクタンスの下限は 10^{-6} W/Kと考えられているが[2]、MEMS技術の実現する熱コンダクタンスは $10^{-8} \sim 10^{-7}$ W/Kであり、MEMS技術は、ハイブリッド技術の限界を超えた非冷却赤外線イメージセンサの性能向上を可能にした[3-5]。

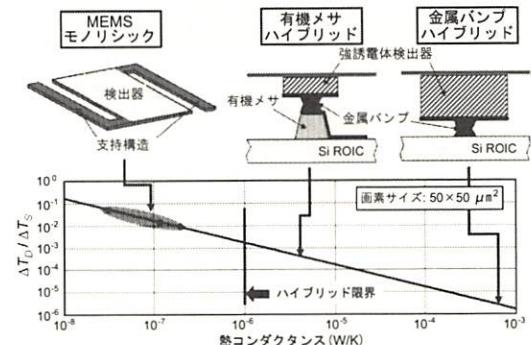


図8 热コンダクタンス低減による感度改善

4.マイクロボロメータ方式とSOIダイオード方式

MEMS技術を利用した非冷却赤外線イメージセンサとしては、いろいろなものが提案されている。しかし、これまでに画素数が640×480画素でNETDが50 mK以下という高い性能を実現しているのは、マイクロボロメータ方式とSOIダイオード方式の非冷却赤外線イメージセンサだけである。ここでは、この二つの方について説明する。

マイクロボロメータ方式の非冷却赤外線イメージセンサは、1992年に米国ハネウェル社が2万画素の素子を発表して[3]、注目を集めようになり、それまで非冷却赤外線イメージセンサで中心の座を占めてきた強誘電体方式に取って代わる存在となった。

図9にマイクロボロメータ方式の画素の断面構造を示す。この構造は、シリコン信号読出回路作製のためのシリコンLSIウエハプロセスに検出器構造を作るためのMEMSウエハプロセスを附加することで形成できるモノリシック構造である。この方式では、半導体ボロメータ材料の抵抗の温度依存性を利用して検出器の温度を計測する。ボロメータ材料としては、酸化バナジウムが主流であるが、アモルファスシリコンを用いた素子も実

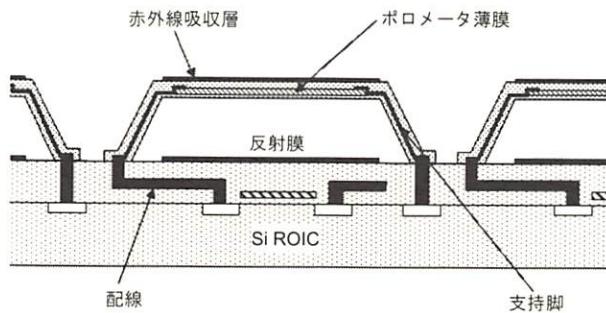


図9 マイクロボロメータ方式の画素の断面構造

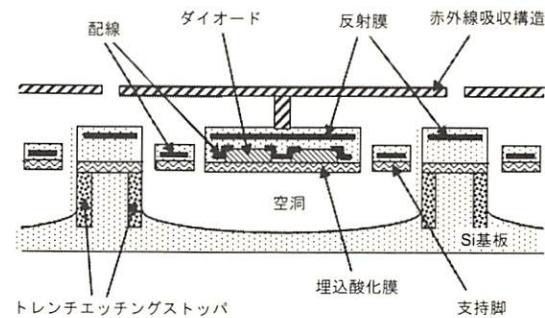


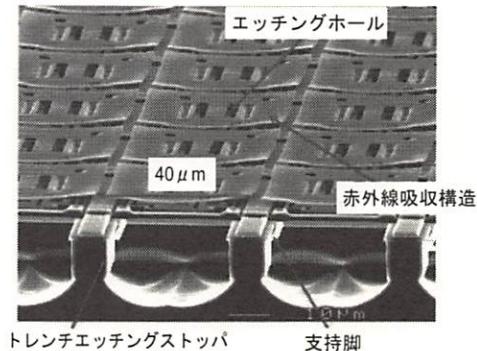
図10 SOI ダイオード方式の画素の断面構造

用化されている[6]。いずれの材料も、室温付近で -2%/K 程度の抵抗温度係数を持っている。図に示すように、ボロメータ薄膜は、信号読出回路が形成されたシリコン基板の上に2本の支持脚で支えられた構造になっている。素子は真空封止されるので、ボロメータ薄膜と赤外線吸収層からなる検出器部分と基板との間の熱コンダクタンスは、支持脚の設計によって決まる。支持脚の作製には、シリコンLSI技術と同じ薄膜形成技術とフォトリソグラフィー技術を利用しているので、微細化が容易であり、3で説明したような低熱コンダクタンスが可能である。図9で、シリコン信号読出上に形成した反射膜と検出器構造体の間に空間となっているが、こうした中空構造は表面マイクロマシニング技術により作製する。表面マイクロマシニングは、中空にする部分に犠牲層と呼ばれる薄膜アイランドを形成したのち、この上にマイクロブリッジとなる検出器構造体を成膜し、最後に犠牲層のみを選択的にエッチングして中空構造を作る技術である。

図10は、SOIダイオード方式の非冷却赤外線イメージセンサ[5]の画素の断面構造を示す図である。SOIダイオード方式の非冷却赤外線イメージセンサは、シリコンLSI技術を利用して温度センサを製作する方式で、最も重要な特長は、温度センサに低雑音の単結晶を使った点である。マイクロボロメータ方式で使用される酸化バナジウムやアモルファスシリコンは非晶質材料であるが、マイクロボロメータ方式では信号読出回路を作製したあとのポストシリコンプロセスでボロメータ薄膜を形成するため、高温処理することができず、温度センサを単結晶化することは難しい。非冷却赤外線イメージセンサでは、温度センサを断熱するために空間に浮かした構造を作る必要があるが、SOI基板の埋め込み酸化膜は基板内の空洞形成時にエッチングストップとして働く。

図10に示す構造のもう一つの重要な特徴は、温度センサとは独立の赤外線吸収構造を持っている点である。この赤外線吸収構造は、下層の支持脚のレイアウトや、ダイオード温度センサ構造の影響を受けず、画素全体を覆うように配置できるので、高い開口率が得られる。

SOIダイオードの画素構造は、シリコン基板内に空洞を形成するバルクマイクロマシニング技術と、赤外線吸

図11 SOI ダイオード方式の画素の SEM 写真
* 口絵にカラー版掲載

取構造を下層構造と分離するための表面マイクロマシニング技術によって作製される。図11は、画素サイズが $40\mu\text{m}$ 角の 320×240 画素の非冷却赤外線イメージセンサの画素のSEM写真で、表面の赤外線吸収構造と基板内に形成された空洞を含む断面構造が確認できる。この画素では、L字型の支持脚で熱コンダクタンスを $1.1\times 10^{-7}\text{ W/K}$ まで低減されている。また、隣接する赤外線吸収構造の間の間隔を $2\mu\text{m}$ とすることで、90%という高い開口率を実現している[5]。

5. 最近の動向

可視光イメージセンサと同様に、画素サイズの縮小と画素数の増大は非冷却赤外線イメージセンサの重要な課題である。1990年代前半に開発が本格化した第1世代の非冷却赤外線イメージセンサでは、画素サイズは $50\mu\text{m}$ 角前後であり、画素数は 320×240 画素クラスであった。第1世代のデバイスの実用化と並行して、次世代の技術開発も着実に進んでおり、既に、画素サイズが $25\mu\text{m}$ 角～ $17\mu\text{m}$ 角、画素数が 640×640 画素の非冷却赤外線イメージセンサが報告されている[7-11]。次世代の非冷却赤外線イメージセンサでは、より進んだMEMS技術で多層構造画素を実現することで、画素サイズ縮小にもかかわらず、第1世代の性能を凌ぐ 50 mK 以下のNETDが得られている。

感度の向上により、8～14 μm帯に比べ放射されるエネルギーが少ない3～5 μm帯の波長域でも実用的なNETDが得られるようになり、多波長イメージングの検討も始まっている[12][13]。可視光イメージングのカラ化と同じように、赤外線波長域においても多波長化により得られる情報が増え、画像認識や温度計測に役立つと考えられている。

また、赤外線の場合、可視光に比べ画像を見たり、画像全体の情報を使ったりする応用は限られており、非イメージング応用が数多く存在すると考えられる。こうした応用に対しては、既存の非冷却赤外線イメージセンサはオーバースペックで、高コストである。一方、広く普及している単画素赤外線センサは、2次元情報を得ることができないため、これまでの分野を超えた応用の拡大は期待できない。こうした現状を踏まえ、赤外線技術の幅広い普及を目指して、それぞれの応用に適した仕様を持った安価な赤外線センサの研究開発も始まっており、特定の画像処理機能を温度センサから得られるアナログ信号を用いて実現するデバイスが報告されている[14]。

6.まとめ

可視光イメージセンサと比べて、赤外線イメージセンサの市場はニッチではあるが、本稿で紹介したように、期待できる応用分野の広範であり、普及が進むことによって得られる恩恵は非常に大きい。非冷却赤外線イメージセンサは、MEMS技術の進歩を背景に進化を続けており、既に1世代前の量子型赤外線イメージセンサの性能レベルを達成している。また、応用分野に合わせた多様化の動きも見られるようになってきた。赤外線イメージセンサでは、未だ少量生産がコストの低減を阻み、普及を進める壁になっているが、こうした壁を打破する環境は着実に整いつつある。

参考文献

- [1] C. Hanson, H. Beratan, R. Owen: Uncooled thermal imaging at Texas Instruments, Proceedings of SPIE, Vol. 1735, pp. 17-26 (1992)
- [2] J. F. Belcher, C. M. Hanson, H. R. Beratan, K. R. Udayakumar, K. L. Soch: Uncooled monolithic ferroelectric IRFPA technology, Proceedings of SPIE, Vol. 3436, pp. 611-622 (1998)
- [3] R. A. Wood, C. J. Han, P. W. Kruse: Integrated uncooled infrared detector imaging array, Tech. Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, pp. 132-135 (1992)
- [4] T. Ishikawa, M. Ueno, Y. Nakaki, K. Endo, Y. Ohta, J. Nakanishi, Y. Kosasayama, H. Yagi, T. Sone, M. Kimata: Performance of 320×240 uncooled IRFPA with SOI diode detectors, Proceedings of SPIE, Vol. 4130, pp. 152-159 (2000)
- [5] W. Radford, D. Murphy, A. Finch, K. Hay, A. Kennedy, M. Ray, A. Sayed, J. Wyles, J. Varesi, E. Moody, F. Cheung: Sensitivity improvements in uncooled microbolometer FPAs, Proceedings of SPIE, Vol. 3698, 119-130 (1999)
- [6] J-L. Tissot, J-J. Martin, E. Mottin, M. Viain, J-J. Yon, J. P. Chatard: 320×240 microbolometer uncooled IRFPA development, Proceedings of SPIE, Vol. 4130, pp. 473-479 (2000)
- [7] D. Murphy, M. Ray, J. Wyles, C. Hewitt, R. Wyles, E. Gordon, K. Almada, T. Sessler, S. Baur, D. Van Lue, S. Black: 640×512 17 μm microbolometer FPA and sensor development, Proceedings of SPIE, Vol. 6542, to be published (2007)
- [8] R. J. Blackwell, T. Bach, D. O'Donnell, J. Geneczko, M. Joswick: 17 μm pixel 640×480 microbolometer FPA development at BAE Systems, Proceedings of SPIE, Vol. 6542, to be published (2007)
- [9] C. Li, G. D. Skidmore, C. Howard, C. J. Han, L. Wood, D. Peysa, E. Williams, C. Trujillo, J. Emmett, G. Robas, D. Jardine, C-F. Wan, E. Clarke: Recent development of ultra small pixel uncooled focal plane arrays at DRS, Proceedings of SPIE, Vol. 6542, to be published (2007)
- [10] M. Ueno, Y. Kosasayama, T. Sugino, Y. Nakaki, Y. Fujii, H. Inoue, K. Kama, T. Seto, M. Takeda, M. Kimata: 640×480 pixel uncooled infrared FPA with SOI diode detector, Proceedings of SPIE, Vol. 5783, pp. 566-577 (2005)
- [11] K. Egashira, T. Yamamoto, K. Kawano, Y. Tanaka, K. Iida, T. Fujishima, Y. Kakimoto, N. Oda: Infrared sensor module using uncooled 320×240/640×480 detector, Proceedings of SPIE, Vol. 6542, to be published (2007)
- [12] J-L. Tissot, A. Crastes, C. Trouilleau, B. Fieque, S. Tinnes: Multipurpose high performance 160×120 uncooled IRFPA, Proceedings of SPIE, Vol. 5406, pp. 550-556 (2004)
- [13] P. W. Norton, M. Kohin: Technology and applications advancements of uncooled imagers, Proceedings of SPIE, Vol. 5783, pp. 524-530 (2005)
- [14] 木股雅章, 浅地伸洋, 太田喬, 高畠晶弘, 島田佳玄, 吉岡文雄, 吉田昌史: Infrared Position Sensitive Detector (IRPSD), 電気学会フィジカルセンサ研究会資料, PHS-07-27, pp. 69-74 (2007)

【略歴】

木股雅章 (KIMATA Masafumi)

立命館大学 理工学部 教授

1976年名古屋大学大学院工学研究科修士課程終了, 1992年大阪大学基礎工学部で工学博士学位取得。1976年三菱電機株式会社入社, 2004年三菱電機株式会社を退社して現職。専門は赤外線イメージセンサを中心としたセンサ技術。

特集 ■ VR と MEMS 技術

MEMS デバイスで感触を与える



式田光宏

SHIKIDA MITSUHIRO

名古屋大学

1. 機械受容器と触覚ディスプレイ

通常、人間と情報機器端末とのインターフェースには視覚や聴覚が用いられる。視覚伝達にはディスプレイが、そして聴覚にはスピーカーが使用される。現在、情報機器端末の更なる高付加価値化を目指して、触覚表示を用いた新たなインターフェースが研究開発されてきている。

機械的な接触に対する受容器として、人間の皮膚にはメルケル細胞、マイスナー小体、ルフィニ終末、パチニ小体がある。これらの細胞は外力による皮膚の変形を刺激として受取り、その感触を人間に伝える。上記受容器は皮膚変形に対する刺激応答により二つに分類される。一つは、遅順応型 (Slowly Adapting: SA 型；持続的な刺激に応答する) で、もう一つは速順応型 (Rapidly Adapting: RA 型；刺激の始めと終わりにのみ応答する) である。また、これらは更に刺激に対する受容野の大きさ (空間分解能) に応じて I 型と II 型とに分類される。I 型は受容野が小さく (空間分解能が高く), II 型は受容野が広い (空間分解能が低い) [1-3]。

機械的な外力で人間に何かしらの情報を伝えるには、これら受容器の特性に応じてデバイスを設計する必要がある。例えば、速順応型の場合、触覚の感受性は皮膚の変形速度に大きく依存し、40Hz 前後と 100 ~ 300Hz で最も高い感度を示す。この場合においては数 μm の変形でさえも人間はその刺激を識別できる。一方、持続的な刺激に応答する遅順応型では、それを反応させるには 100 μm 近い皮膚変形が必要になる。一般に、従来機械加工技術で作製される触覚ディスプレイの大きさはデスクトップサイズになっており、数 mm ピッチで配置したピンが上下方向に数十 μm ~ 数百 μm 変位するものが多い [2][4]。

2. 触覚ディスプレイへの MEMS 技術の導入

半導体微細加工技術を応用展開した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術は、機械要素 (構造体、センサ、アクチュエータ) を微小化・集積化するために、これまでデスクトップサイズの床面積を必要としてきた触覚ディスプレイを小型化できる可能性がある。このようなことから、近年 MEMS 技術を触覚ディスプレイ開発へと展開する試みがなされている。以下に、主な研究開発例を紹介する。

① 空気圧源を用いたバルーン触角ディスプレイ [5][6]

L. Yobas (Case Western Reserve Univ.) らは、樹脂製表示デバイス (ダイアフラム構造), マイクロバルブ (表示ダイアフラムに供給するガスを制御する), 空気圧源とからなる触覚ディスプレイを提案している。MEMS 技術を用いてガス制御バルブをマイクロ化し、システム全体の小型化を図っている。X. Wu (Georgia Inst. Tech.) らは、空気圧駆動時における樹脂製表示部の変形挙動を安定化させることを目的として、MEMS 技術を用いて樹脂製ダイアフラム内に骨格構造を組み込んでいる。直径 1.5 mm の樹脂製表示部が 1mm 間隔で配置されている。外部空気圧源を用いているために、数百 μm 以上の大変位及び数十 mN の大出力が可能である。但し、外部空気圧源が必要なためにシステム全体の小型化には限界がある。

② 形状記憶合金製コイルを用いたディスプレイ [7]

T. Matsunaga (東北大) らは、形状記憶合金製コイルばねを駆動源にした触覚ディスプレイを開発している。ディスプレイは表示ピンを駆動するための形状記憶合金製のコイルばねとラッチ用の永久磁石とで構成されている。ピンのピッチは 2 mm で 10 × 10 のアレイになっている。形状記憶合金を駆動源にすることで実仕様を満た

す高出力(ストローク2mm)を得ている。また、ピンの出具合を3段階に切り替えることができ、それぞれの状態を永久磁石により自己保持できる特徴がある。デバイス全体の大きさは、パームトップサイズ(25mm×25mm×80mm)と小型化が図られている。しかしながら、各ピンを独立駆動するために、それぞれのピンに対応した駆動用コイルが必要となり、更なる小型化は難しい。

③ 薄膜形状記憶合金を用いたSi製ディスプレイ [8]

上記①②は何れもシステム全体の大きさが数十mm以上と比較的大きい。そこでW.Yoshikawa(京都大)らは、駆動源として薄膜形状記憶合金を用いることで、デバイスの厚さを極限まで薄型化(数mm)するというアプローチを提案している。Si製両持ち梁構造に駆動用の形状記憶合金薄膜が形成されている。加熱することで30μmの変位が得られているが、出力が4mNと比較的小さい。

④ 热駆動型バブル触覚表示ディスプレイ [9-11]

上記③と同様に、本熱駆動型もMEMS技術を用いて超薄型化を図ったものである。T.Imamura(名古屋大)らは、突起部を有する樹脂製ダイアフラム、液体を密封するためのフレーム、ヒータ付き基板、作動液体からなる熱駆動型触覚表示ディスプレイを提案している。ヒータ加熱によりバブルが発生し、これによる体積変化で表示突起が駆動される(図1参照)。デバイス全体の大きさは15mm×15mm×1mmとチップサイズになっており、数百mJの投入エネルギーで数十μmの変位が得られている。また、J.S.Lee(Imperial College London)らは、駆動媒体としてパラフィンを用いた熱駆動型触覚表示ディスプレイを提案している。デバイスの大きさ(この中に2×3のドットが形成されている)は7mm×8.5mm×2mmと小さく、数百μmの変位を得ている。

上記①②の例で示したように、従来ディスプレイの一部にMEMS技術を導入することで、デバイス全体の大きさをデスクトップからパームトップサイズまで小型化できる。しかしながら、更に、これを上記③④で示したように、MEMSアクチュエータ技術を用いて、その厚さを数mmサイズまで薄型化すると、ある程度の変位は確保できるものの発生力が数mNと低下してしまう。一般に、MEMS技術を用いることで、アクチュエータの大きさを数mm以下に小型化することは可能であるが、サイズの縮小化に伴い発生力も減少する。このためMEMSアクチュエータの用途は、これまで外部に対して大きな仕事をする必要がない応用先(例えば、光MEMSなど)に限られてきている。このように、現状の

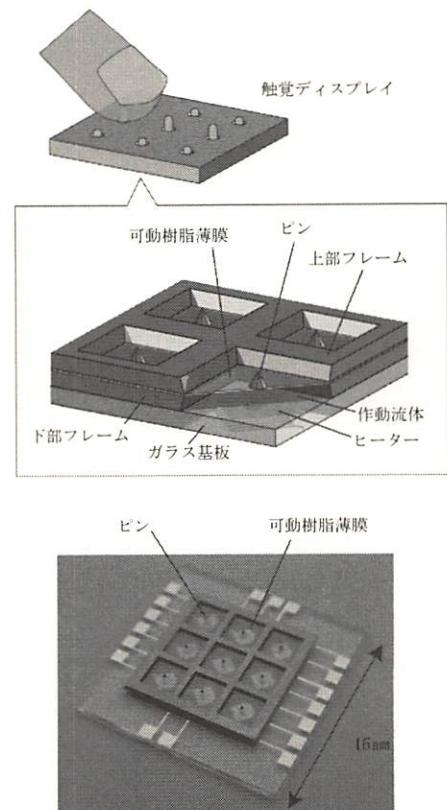


図1 热駆動型バブル触覚表示ディスプレイ
*口絵にカラー版掲載

MEMSアクチュエータ技術では、それをそのまま触覚ディスプレイに適用することが難しく、仮に組み込んだ場合には、十分な発生力を得にくいという問題が生じる。

3. ハイブリッド技術による触覚ディスプレイの開発

上記2で述べたように、MEMSアクチュエータ単体では大出力を得ることが難しい。そこで筆者らは、ミリメートルサイズのアクチュエータ技術とMEMSアクチュエータ技術とを融合させることで、触覚情報を伝達するために必要な発生力を確保しつつ、デバイス全体の大きさを縮小化するというアプローチを提案している。具体的には、システム全体の出力を单一のミリメートルサイズアクチュエータ、例えば小型ステッピングモーターで確保し、これの出力をMEMS技術で作製した多数のマイクロアクチュエータ(クラッチ)でアレイ状表示部に分配するという仕組みである[12-14]。以下にその詳細を述べる。

(1) ハイブリッドアクチュエータ型触覚ディスプレイ

ハイブリッド触覚ディスプレイの概念を図2に示す。ディスプレイは三つの要素からなる。

・表示ディスプレイ：

表示ディスプレイは、人間に刺激を与える微小突起、突起を支えるダイアフラム及びフレーム、微小突起部の上下運動に必要な下部突起部(この部分がクラッチの噛み合いの一部となる)からなる。

・MEMS クラッチ機構：

MEMS 技術で作製された多数のアレイ状マイクロアクチュエータからなる動力伝達部である。マイクロアクチュエータアレイでブロックを移動させ、クラッチの噛み合いを決定する。

・ミリメートルサイズアクチュエータ：

小型ステッピングモータで構成されシステム全体の出力を担う。

上記ハイブリッド触覚ディスプレイでは、先ず、MEMS クラッチ機構においてブロックを移動させ、表示ディスプレイ裏面にある突起との噛み合い状態を決定する。その後、ミリメートルサイズアクチュエータで MEMS クラッチ機構全体を押し上げ、クラッチが噛み合っている部分のみ、その出力を表示デバイスへと伝達する(図 2(c)参照)。本デバイスには、以下の特徴がある。

- ① ミリメートルサイズアクチュエータがデバイス全体の出力を担っており、MEMS アクチュエータ部(クラッチの噛み合いのみを制御すればよい)には大きな出力はいらない。また、固体接触による動力伝達などでスリッピングなどがない。
- ② MEMS 技術を用いて表示ディスプレイ及びクラッチ部を作製するために、素子の高密度化に対応できる。

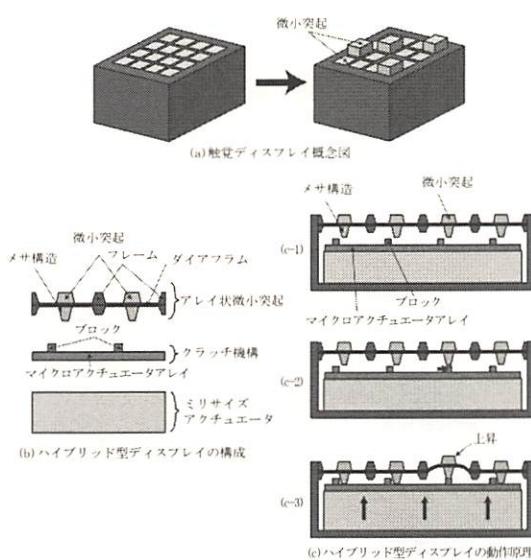


図 2 触覚ディスプレイの構造及び動作原理

(2) ハイブリッド触覚ディスプレイ構成要素

(2)-1 表示ディスプレイ

表示ディスプレイの試作例を図 3 に示す。作製には MEMS デバイス加工に用いられる、ホトリソグラフィーとアルカリ性水溶液による結晶異方性エッチング技術を使用している。単結晶 Si 製微小突起の大きさは 0.1mm 以下で 4×4 のアレイ状に形成されている。突起のピッチは 1.2 mm で樹脂製ダイアフラム (1 mm×1 mm×0.04 mm) 上に形成されている。

(2)-2 MEMS クラッチ機構

MEMS クラッチは、ミリメートルサイズアクチュエータの出力をアレイ状表示ディスプレイに分配する役目を担っており、ディスプレイ素子と同様のピッチで配置される。MEMS クラッチの概念図及び単一素子の構造例を図 4 に示す。図に示したように、クラッチ単一素子は「チューリップ型静電アクチュエータ構造」になっている。チューリップの花びらの部分が、クラッチの噛み合いを決定するブロックに相当している。茎と花びらが基板から浮いた状態(片持ち梁)になっている。左右に位置する葉が駆動電極になっており、静電気力で茎及び花びらを駆動する。なお、葉の輪郭は曲線形状をしており、小さい静電気力でも大変位が得られるよう工夫してある。

MEMS 技術で作製したチューリップ型静電アクチュエータの写真を図 5 に示す。アクチュエータ部の厚さは 0.02 mm で SOI (Silicon On Insulator) 基板におけるデバイス層を用いて作製している。また、デバイスの加工には、MEMS 特有の DRIE (Deep Reactive Ion Etching) と犠牲層

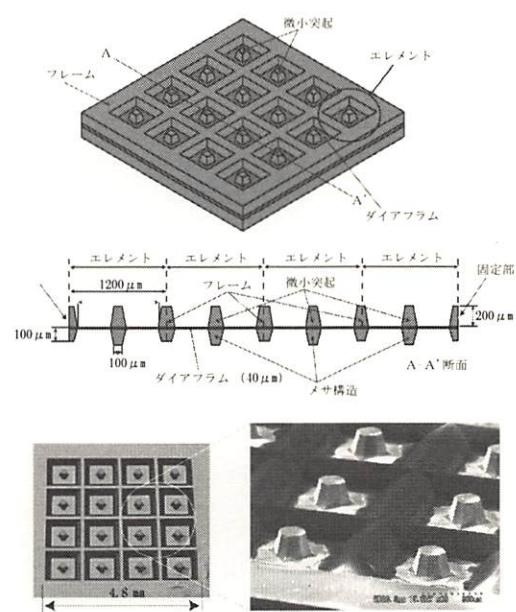
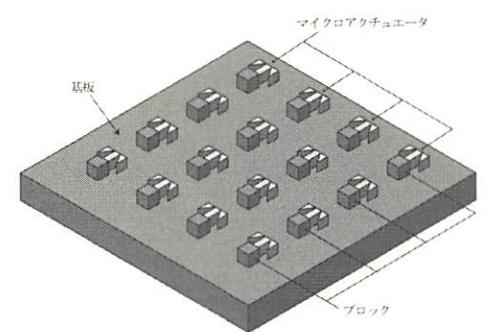


図 3 単結晶 Si 製触覚表示ディスプレイ

エッティング技術を用いている。電圧印加によるチューリップ型アクチュエータの駆動の様子と印加電圧と花びら中心の変位との関係を図6に示す。

(2)-3 ミリメートルサイズアクチュエータ

上記に示したように、ミリメートルサイズアクチュ



(a) MEMS クラッチ概全図

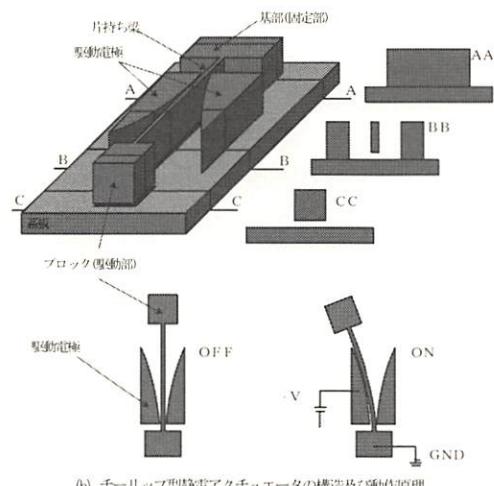


図4 MEMS クラッチ及びチューリップ型静電アクチュエータの構造及び動作原理

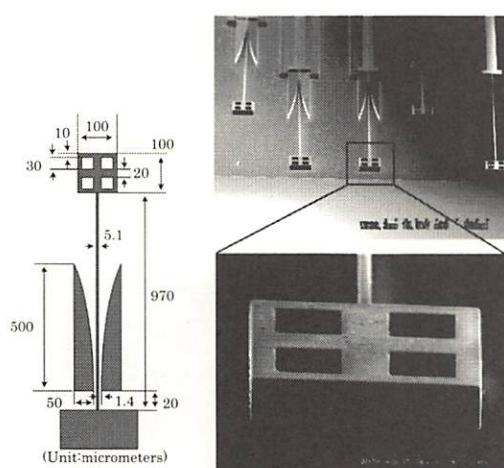


図5 MEMS 技術で作製したチューリップ型静電アクチュエータ

エータがデバイス全体の出力を担う。数十mN以上の発生力と数十 μm 以上の変位を確保するために、本駆動部には市販のステッピングモータを利用している。なお、ステッピングモータを駆動源にした場合、モータの回転運動を直線運動に変換する機構が必要となる。図7には、ねじを用いてリニア駆動にした場合を示した。

(3) ハイブリッド触覚ディスプレイの実装および動作

上記MEMS技術で作製した触覚表示ディスプレイ及びMEMSクラッチと、ステッピングモータを利用したミリメートルサイズアクチュエータとをハイブリッド実装することで、大きさ30mm×30mm×40mmの試作モデルを作製した(図8参照)。本モデルでは静電クラッチの噛み合わせに応じて、表示部が上下方向に、数百mNの発生力で20 μm 駆動する。

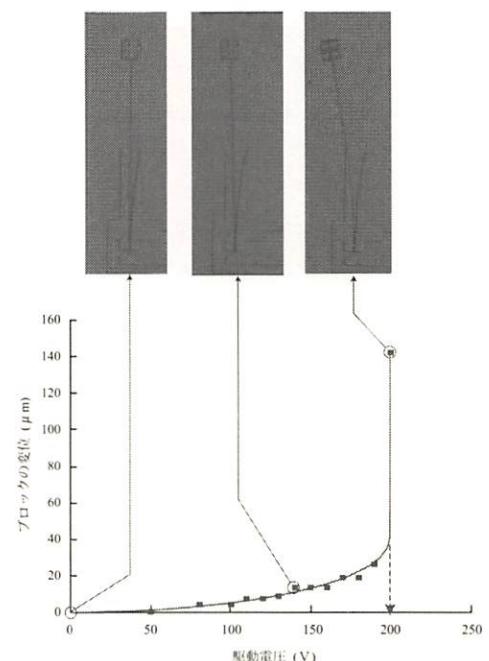


図6 電圧印加によるチューリップ型アクチュエータの駆動の様子と印加電圧と花びら中心の変位との関係

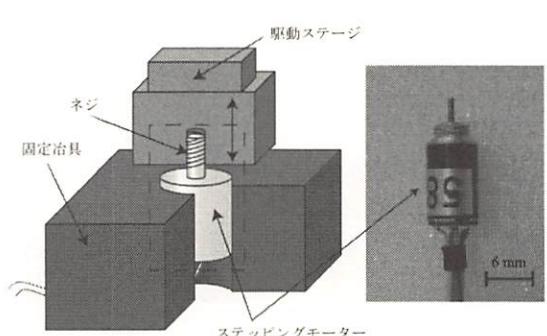


図7 ステッピングモータを用いた駆動源

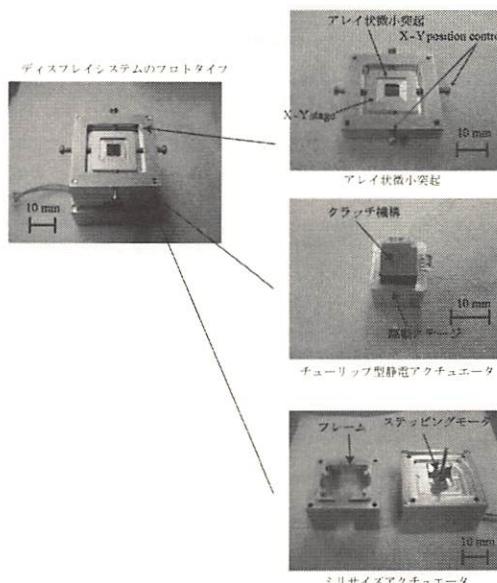


図 8 ハイブリッド触覚ディスプレイの試作モデル

4. おわりに

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術は、機械要素(構造体、センサ、アクチュエータ)を微小化・集積化するために、触覚ディスプレイを小型化できる可能性がある。本解説では、先ず、これまでに研究開発されてきた MEMS 触覚ディスプレイを紹介するとともにその問題点を述べた。次に、ミリメートルサイズのアクチュエータ技術と MEMS のマイクロ技術とを融合させることで、触覚情報を伝達するために必要な発生力を確保しつつ、デバイス全体の大きさを縮小化するというアプローチを紹介した。何れのアプローチにしても如何にして実仕様を満足する MEMS アクチュエータを実現するかが触覚ディスプレイ小型化の鍵を握っている。

参考文献

- [1] 津田基之 編修: 知覚のセンサー 生物の巧みなシグナルの獲得, 日本生物物理学会編修, 吉岡書店
- [2] 超五感センサの開発最前線, エヌ・ティー・エス
- [3] R. S. Johansson and A. B. Vallbo: Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand, *Trends in NeuroScience*, 61, 1, pp. 27-32 (1983)
- [4] W. Gu, X. Zhu, N. Futai, B. Cho, and S. Takayama: Computerized microfluidic cell culture using elastomeric channels and braille display, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 101, 45, pp. 15861-15866 (2004)
- [5] L. Yobas, D. M. Durand, G. G. Skebe, F. J. Lisy, and M. A. Huff: A novel integrable microvalve for refreshable braille

display system, *J. Micro electro mechanical Systems*, 12, 3, pp. 252-263 (2003)

- [6] X. Wu, H. Zhu, S-H. Kim, and M. G. Allen: A portable pneumatically-actuated refreshable braille cell, *Tech. digest of Transducers 2007*, pp. 1409-1412 (2007)
- [7] T. Matsunaga, W. Makishi, K. Totsu, M. Esashi, and Y. Haga: 2-D and 3-D tactile pin display using SMA micro-coil actuator and magnetic latch, *Tech. Digest of Transducers 2005*, pp. 325-328 (2005)
- [8] W. Yoshioka, A. Sasabe, K. Sugano, T. Tsuchiya, O. Tabata, and A. Ishida: Vertical drive micro actuator using SMA thin film for smart button, *Tech. digest of MEMS 2006*, pp. 734-737 (2006)
- [9] T. Imamura, M. Shikida, and K. Sato: Bubble driven arrayed actuator device for a tactile display, *Proc. of the 23rd Sensor Symposium*, pp. 233-236 (2006)
- [10] S. Ukai, T. Imamura, M. Shikida, and K. Sato: Bubble driven arrayed actuator device for a tactile display, *Tech. Digest of Transducers 2007*, pp. 2171-2174 (2007)
- [11] J. S. Lee, and S. Lucyszyn: A micromachined refreshable braille cell, *J. Micro electro mechanical Systems*, 14, 4, pp. 673-682 (2005)
- [12] H. Sasaki, M. Shikida, and K. Sato: A novel type of mechanical power transmission system for haptic display, *Proc. of the 23rd Sensor Symposium*, pp. 197-200 (2006)
- [13] H. Sasaki, M. Shikida, and K. Sato: A force transmission system based on a tulip-shaped electrostatic clutch for haptic display devices, *J. Micromechanics and Microengineering*, 16, pp. 2673-2683 (2006)
- [14] S. Takagi, H. Sasaki, M. Shikida, and K. Sato: Electrostatic latch mechanism for handling projection on arrayed vertical motion system, *Tech. Digest of Transducers 2007*, pp. 1147-1150 (2007)

【略歴】

式田光宏 (SHIKIDA Mitsuhiro)

名古屋大学 大学院工学研究科

マイクロ・ナノシステム工学専攻 准教授

1990 年成蹊大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了, 1990 年株式会社日立製作所入社, 1995 年同社退社, 1995 年名古屋大学工学部助手, 1998 年工学博士(名古屋大学), 2001 年同大学難処理人工物研究センター講師, 2004 年同大学エコトピア科学研究機構助教授, 2007 年 4 月より現職. 専門は MEMS 工学.

会議参加報告



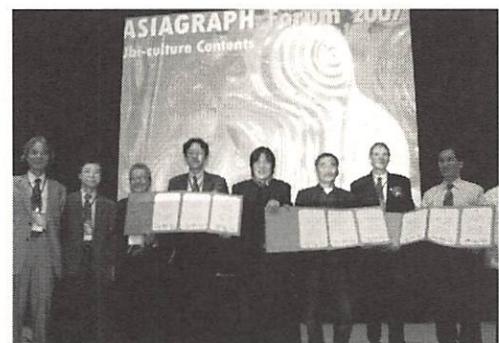
■ ASIAGRAPH Forum 2007

綿貫啓一

埼玉大学

2007年5月24日(木),25日(金)の2日間にわたり,中国上海科学堂および金庭酒店において,ASIAGRAPH Forum 2007が開催された。ASIAGRAPHとは,日本製アニメやCG,ゲーム等の影響を受けて発達したアジア独自の表現様式によるCG作品,メディアアート,映像作品などの優れたデジタルコンテンツと,それを支える学術研究,産業技術などを一堂に集めた祭典である。

第1日目は,開会の挨拶の後,ACM SIGGRAPH会長のScott Owen氏による「デジタル時代の将来」と題して基調講演があった。会場には,日本,中国,韓国を中心に約100名の参加者が聞き入っていた。講演では,コンピュータやインターネットの過去・現在・未来,コンピュータグラフィックスやインタラクティブ技術の動向,最近のコミュニケーションに関する問題点や3次元バーチャルワールドに関する顔の表情やジェスチャなどの研究動向,さらには最近話題のセカンド・ライフについて述べられた。また,デジタル・アートやコンピュー



ASIAGRAPH 協定式

タ・アニメーション・フェスティバルに関して,アジアにおけるSIGGRAPH活動は今後ますます重要となると述べられ締めくくられた。

引き続き,砂田向壱先生(九州大学)からは,日本の産業の強みの分析,次世代デジタルコンテンツ研究振興のための取組みが述べられた。内丸幸喜先生(東北大学)からは,文化芸術に資する科学技術をめぐる現状と問題点が述べられた。薛琪煥氏(韓国文化コンテンツ振興院)からは,韓国のデジタルコンテンツ産業政策について述べられた。

ASIAGRAPH協定式において,中国実行委員長の肖泳亮先生(中国北京師範大学),日本実行委員長の河口洋一郎先生(東京大学),韓国実行委員長の金東鉉先生(韓国世宗大学校)が協定書に署名し,握手が交わされた。また,金鍾琪先生(亞州芸術科学学会会長/韓国東西大学校)からASIAGRAPHの事業計画が披露された。

第1日目の午後からは16件,第2日目は18件の講演があった。日本からは,「日本バーチャルリアリティ学会の紹介」,「対話的なビデオエージェント」岸野文郎先生(大阪大学),「デジタルパブリックアートのためのバーチャルリアリティ技術」廣瀬通孝先生(東京大学),「ハプティックインタラクションの可能なアクティブラーニング」佐藤誠先生(東京工業大学),「CGに



ASIAGRAPH Forum 2007 の様子

反応するジェレーションスクリーンの芸術」河口洋一郎先生(東京大学)らをはじめ、17件の招待講演があった。中国や韓国からも文化芸術、CG メディアアート、VR 技術などに関する先端的な研究成果が発表された。

第1日目の夜には、上海工程技术大学総長主催の晩餐会が開かれ、日本、中国、韓国の研究者らの交流が深められた。

今回の ASIAGRAPH Forum 2007 に参加して、先端的な科学技術をベースとした媒体芸術分野においては、アジアの多様性は世界からも注目されており、今後も大いなる発展が期待されていることをあらためて感じた。この先端科学技術と媒体芸術の融合を持続的に発展させるためには、継続的かつ本格的な学術・文化交流を行うことが大切であり、この ASIAGRAPH が研究の発信源であり、交流の場であり続けることを願う次第である。

■ 第17回「人工現実感研究会」

西村邦裕

東京大学

2007年6月4～5日の2日間、東京大学山上会館にて、日本バーチャルリアリティ学会第17回研究会「人工現実感研究会」が電子情報通信学会 マルチメディア・仮想環境基礎研究会、映像情報メディア学会 ヒューマンインフォメーション研究会、ヒューマンインターフェース学会との共催で開催された。同じ会場にて、本学会の「第3回ウェアラブル／ユビキタス VR 研究会」も併催され、両方の発表を行き来して聴講する姿などが見られた。本研究会では、脳波を用いた研究から、認知心理学的な研究や可視化、LED や水滴を用いたディスプレイ装置の設計などと幅広い発表が22件なされた。余裕をもったプログラム構成であったため、研究の背景などを含めた詳細な発表と活発な質疑がなされていた。

一日目には12件の発表があった。把持の動作モデルに基づいた手指のカメラトラッキングシステムやジェスチャインタフェースを用いた3次元モデルシステムの試み、磁場センサを利用した卓球フォーム改善システムなどの提案がなされていた。また、視触覚統合における錯覚や仮想物体の変形に対する視触覚間同時性知覚といった人間の知覚に対する研究も発表されており、興味深かった。その他、PDA を用いたシースルーアイインターフェースの提案や、テーブルトップ型作業環境における協調作業支援システムにおいてバージョン管理を活用する提案、などがなされていた。

二日目には10件の発表があった。ビデオエージェントのためのユーザインタフェースシステムや時間軸と空間軸を利用した写真検索インタフェースなどの提案、水滴ディスプレイの試作、LED を用いた全天空人工照明装置や様々なスクリーンの奥行き知覚の研究などが発表されていた。

個人的に興味を持った発表として、電気通信大学の稻見昌彦氏による「画像提示装置を用いた顕微鏡下のロボット制御」と題した発表があった。稻見氏らはこれまでにも情報機器に対するディスプレイの研究をしてきており、ロボットに対して情報提示や制御を行うことを行ってきた。今回は撮像光学系をプロジェクタに流用し、顕微鏡を用いることでマイクロマシンなどのロボットの制御に用いることができるか、という試みの発表であった。顕微鏡にプロジェクタをつけるという簡単な構造ながら、4分割フォトダイオードを受光部に用いてロボットを制御することを行い、サブミクロン単位でのロボット制御を可能としており、興味深かった。

また、東京工業大学の松本齊子氏により、NICT のユビキタスホームを用いた実験におけるロボットと居住者の対話ログの解析が発表された。ロボットに対して愛着を持つつつある、という内容であったが、ロボット自体に愛着を持っているのか、ロボットの持つ話し方や内容などがあるからこそ愛着を持つのか、などといった議論となり盛り上がっていた。今後、詳細な解析で新たな発見があればさらに面白いだろうと思う。

今回は研究会ということもあり、今後の発展が楽しみな研究などが多く、筆者にとって有意義な学会であった。関連サイト：

<http://www.his.gr.jp/activities/meeting/read.html?044.pro>

■ ACE 2007

細井一弘

東京大学

今年で4回目となる、ACE 2007 (International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology) が、6月13日から15日までの3日間、オーストリアのザルツブルグで開催された。ACEは、エンターテイメントコンピューティングに主眼をおいた会議であり、今回の会議では、AR やハapticデバイスなどの様々な技術をエンタテインメントに応用した研究からオンラインゲームやマルチプレイヤーゲーム上で起きる人間同士のソーシャルインタラクションについての分析など、様々な研究発表が行われた。

会議の行われたザルツブルクは、サウンドオブミュージックの舞台やモーツアルトの生まれた町として知られている。

会場は旧市街にあったため、会場の周りには歴史的な建築物が至るところに見られた。ザルツブルクの日は長く、夜9時ごろまで明るいため、初日のプログラム終了後にはザルツブルク観光のツアーが企画された。また2日目に行われたパンケットの前には、ヘルンブルン宮殿の*trick fountain*を巡るツアーも行われた。庭園の至る所に仕掛けられた噴水をガイドが巧みに操り、水をかけてくるのでそれから逃げ惑うのに必死であった。中世のエンタテインメントを体験するツアーではあったが、日本人参加者の中には水をかけられて少々不機嫌になる人たちもいた。エンタテインメントの文化の違いを感じるツアーであった。

会議は、口頭、ポスター、デモ発表の三つに分類され、口頭発表はlong paperとshort paperをおりまして、八つのセッションにわけて発表が行われた。それぞれの発表件数は、long paper:18件、short paper:21件、ポスター:25件、デモ:16件である。このうち、日本からの参加件数はlong paper:4件、short paper:6件、ポスター:6件、デモ:11件であり、多くの日本人の活躍が見られた。

ACEの特徴の一つでもあるデモ発表は14、15日の2日間で行われた。当初、1日当り9件の発表が行われる予定であったが、15日発表予定のグループのいくつかが14日からデモ発表を行っていたため、デモ初日はかなりの盛り上がりを見せた。デモ発表中にbest demonstration awardを決める投票が行われ、会議の最後に表彰がされた。デモ発表は日本からの参加件数が多かったこともあり、慶應大学の内田氏らの“*kage no sekai*”と関西学院大学の小岩氏らの“*Crossing Colorful Communication*”の二つの日本人の研究が選ばれた。“*kage no sekai*”は、テーブルの上に置かれた物の影の中に影の世界の住人が活動をしていて(テーブルの下からプロジェクタで投影されたアニメーション)、手でその住人に触れようとすると隠れてしまうというコンテンツである。小岩氏らの“*Crossing Colorful Communication*”は、テーブルの上に三つのマイクが設置しており、体験者が声を発するとテーブル上に光の模様が浮かび上がる(模様はプロジェクタから投影される)。3人が同時に会話することでそれぞれの模様がぶつかり、交じり合うことで、音によるコミュニケーションを支援する作品となっている。その他のデモ発表も、この会議に相応しいエンタテインメント性に富んだインタラクティブなシステムであった。

来年のACE2008は2008年12月に横浜で開催される予定である。国内で行われるので、日本の研究者にとっては比較的参加しやすいと思われる。また、大掛かりな

機材を必要とするデモンストレーションも準備しやすいと思うので、エンタテインメントに関する様々な研究が発表されることを期待する。

関連サイト：<http://www.ace2007.org/>

■ Smart Graphics 2007

北岡伸也

大阪大学

2007年6月25から27日の3日間、京都にてSG 2007 (7th International Symposium on Smart Graphics)が開催された。Smart Graphicsは、その前身となった会議である AAAI Spring Symposium を含めて、今回で通算8回目の開催となる国際会議である。今年は、初の日本開催(初のアジア開催でもある)であり、平安神宮近くの「京都市觀業館みやこめっせ」が会場となつた。本会議に、聴講者として参加する機会を得たのでここに報告する。

本会議の発表件数は、Full paperが15件とPosters and Demosが13件であった。Full paperはInteraction, Lifelike characters and Affective Computing, Knowledge-Based Graphics Generation and Interaction, Visualization and Graphics Algorithmsの四つのカテゴリに分かれていたが、Posters and Demosを含め全てシングルセッションで構成されており、プログラムは比較的ゆったりと余裕のあるものだった。また、Full paperの採択率は、カテゴリによって異なるが31%～36%程度とのことであり、日本からの発表も3件あった。会議への参加者は約30名と比較的規模は小さいものであったが、質疑応答が盛んに行われ、非常に活発な意見交換がなされていた。

会議初日は、スケッチモデリングや仮想環境における各種インタラクション手法、アバタ操作に関する研究の発表が行われた。その後、デモセッションが催された。二日目には、電気通信大学の稻見昌彦先生による招待講演が行われ、その後、ポスター発表が行われた。ポスター発表では、展示だけでなく15分程度の登壇発表も合わせて行われていた。このように、ポスター発表でも登壇の機会が与えられることは、研究を紹介し活発な意見交換を促すという面で、非常に有用な試みであると思う。同日の夜にはレセプションが開催され、会議参加者間の密な交流がなされていた。最終日である三日目には、グラフィックスにおける各種知識の利用技術や新規アルゴリズムの提案に関する発表があった。

稻見先生の招待講演では、ご自身のユニークな研究の



SG2007 稲見先生による招待講演の様子

数々が紹介されており、非常に興味深い講演を聞くことができた。従来のインターフェースは主にオフィス向けであり、いわば Cool Interface であるが、コンピュータが身近になった現代では家庭向けのインターフェースとしての Kawaii Interface を考えていく必要があるという話は、非常に興味深い主張だと思った (Kawaii は、そのまま日本語の“かわいい”的ことで、近年、英語圏やフランス語圏に輸出され定着しつつある)。

以下では、個人的に興味を持った発表についていくつか紹介させていただく。

University of Calgary の P. Neumann 氏らによる “NPR Lenses: Interactive Tools for Non-photorealistic Line Drawings” は、NPR により二次元的に表示された三次元物体に対して、二次元のインタラクションで用いられているようなレンズの効果を適用できるようにする手法を提案している。三次元でレンズの効果範囲を適用することで、局所的な線種の変更や隠線の表示を実現していた。

Griffith University の C. He 氏らによる “A Novel Human Computer Interaction Paradigm for Volume Visualization in Projection-Based Virtual Environments” は、トラックグローブと呼ばれる六自由度のデバイスを用いたボリュームデータに対する種々のインタラクション手法を提案している。インタラクションを Viewpoint Control, Object Selection and Manipulation, System Control に分けて考えることで一連の一貫したインタラクションを実現していた。

九州大学の寺井氏らによる “Tail-Based Modeling and Rendering” は、二次元コンピュータゲームのマップのような俯瞰図を用いて、三次元構造をモデリングするシステムを提案している。事前に定義したタイルパターンの組み合わせから三次元構造を推定しており、遮蔽がある場合でも、その組み合わせから直感的に正しいと思われるモデルを生成できていた。

なお、本会議に関する詳細情報は、次の URL を参照されたい。

<http://www.smartgraphics.org/sg07/>

■ 3次元画像コンファレンス 2007

高橋桂太

東京大学

2007年7月12日(木), 13日(金)の二日間にわたり、東京大学武田先端知ビル武田ホールにて、3次元画像コンファレンス 2007 が開催された。本コンファレンスは、3次元画像データの入力技術に始まり、情報処理技術、ディスプレイ技術、および医療やバーチャルリアリティなどの応用分野など、3次元画像に関わる幅広い内容をカバーするものである。二日間で延べ 170 人以上の出席があり、活発な議論が行われた。

本コンファレンスは 1993 年より毎年開催されており、今年でちょうど 15 周年を迎える。節目を記念して、第一回目(1993 年)の実行委員長を務められた本田捷夫先生(千葉大学)より「2015 年の立体映像普及の予想」と題する特別講演が行われた。招待講演者は科学警察研究所の宮坂祥夫先生で、「白骨死体からの顔貌の復元」と題して、犯罪捜査における復顔法について興味深い講演がなされた。また、医療分野における実用的な 3 次元技術に焦点を当てた「企業セッション」では、3 社からの講演および製品展示が行われた。

一般発表では、査読を通過した 48 件の発表(講演 28 件、ポスター 20 件)が行われた。

NICT と NHK のグループより、インテグラル・フォトグラフィのデータを、ホログラムに変換・表示する方式が発表された。ホログラムは理想的な立体表示方式として知られるが、撮影の際に特殊な暗室環境やレーザ光が必要という制約がある。提案方式では、自然光下で撮影可能なインテグラル・フォトグラフィを入力として用いるため、レーザ照射に適さない様々な被写体を対象にできるという長所がある。また、ホログラムの表示光学系を三重化することで、視域を広げる工夫もなされていた。

筑波大のグループからは、ボリューム表示と多視点表示を組み合わせた新しい仕組みのディスプレイが発表された。ボリューム表示部では、人の目の焦点調節を誘導する効果のあるエッジ画像のみを表示し、多視点表示部分では、エッジを平滑化した視差画像を提示する。この方式では、精密な 3 次元ボリュームデータが不要でありますながら、人の目に疲労感をもたらす輻輳調節矛盾を解決できるという特徴がある。また、焦点調節の誘導効果を確認するための評価実験についても報告された。

そのほか、多視点カメラ映像から生成された人物の動的メッシュモデルを、モーションキャプチャによる骨格モデルとマッチングする手法(東大)や、多眼カメ

ラ装置で取得された画像を効率的に調整して、理想的な配列の多眼画像に変換する手法（名古屋大）などが報告された。

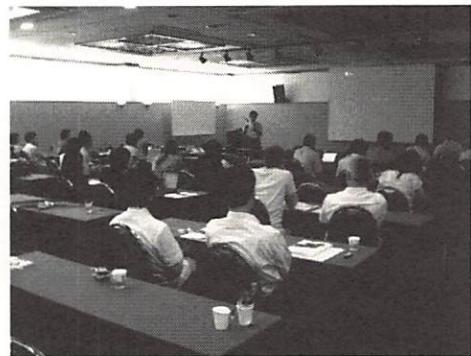
ポスターセッションでは、通常のポスター発表に加え、実機持込によるデモ展示も多数行われた。64眼カメラアレイ（東大）や超大画面三次元ディスプレイ用のピクセルモジュール（東京農工大）などでは、数時間かけて入念なセットアップ作業が行われた。セッション開始前のランチタイムから、各ブースに次々と人だかりができ、熱心な議論が交わされていた。

本コンファレンスは五つの学会・研究会が持ち回りで運営を担当する形になっている。今年度は日本医用画像工学会が担当し、来年度は画像電子学会が担当となる。来年度の開催日程・会場等の詳細については、後日発表される。

関連サイト：<http://www.3d-conf.org/>



3次元画像コンファレンス 2007
ポスターセッションの様子



CollabTech2007 発表の様子

ため論文が採択されにくいという問題もある。そのような問題を解決し、アジア地域から先進的な研究を発信するための会議として CollabTech が開催されている。

CollabTech2007 では、全部で 24 件の論文、1 件のチュートリアル、および特別講演から構成された。24 件の論文のうち、15 件が日本、8 件が韓国、1 件がオーストラリアからの発表であった。

Electric Visualization Laboratory (EVL, University of Illinois at Chicago) の Andrew Johnson 氏による特別講演では、Immersive Display や Tiled Display などに関する EVL での取り組みについて紹介があった。EVL ではシステムを開発するだけではなく、それらを様々な分野に適用することで有効性を検証している。講演では、実際に技術が適用できるフィールドの人々と共同研究を行うことが、将来への新しい技術の発展に対して有効であると訴えていた。

一般発表では多数の興味深い発表が行われていたが、紙面の都合もあるので CollabTech2007 Best Paper Award を受賞した研究を一つ紹介したい。慶應大学の宮田氏らによる研究「Conference Movie Digesting System using Mental States and Wordless Scenes」では、会議のダイジェストムービーを作成する手法として、心理的状態と無発言シーンの組み合わせを提唱している。心理状態として、参加者の EEG を元に計算される MS-Level (Mental State Level) を利用することで、活発に議論が行われている場所の抽出をしている。無発言状態は映像の分割に利用している。EEG を用いることが適切かどうかについては会場でも活発に議論されたが、生理指標をダイジェストムービー作成に適用している研究は少なく、CollabTech らしい研究の一つであると言える。

CollabTech2008 は再び日本に戻り、8 月に和歌山で開催される予定である。投稿規定、各種締切等は随時下記の URL で公開されているので、是非定期的にチェックしていただきたい。

<http://www.collabtech.org/>

CollabTech 2007

山下 淳
筑波大学

コラボレーション技術に関する国際会議である CollabTech2007 は、2007 年 7 月 12 日および 13 日に、ホテルソウル教育文化会館（韓国・ソウル市）にて開催された。過去 2 回の会議は日本（東京、つくば）で開催されたが、第 3 回目の今年は初の海外開催となった。

CollabTech が主として扱うテーマは、グループウェアに代表される共同作業支援システムに関する研究である。このような分野を扱う国際会議は他にも数多く存在するが、それらの多くは分析に重点を置いており、荒削りではあるが面白い研究を採択されにくいという問題がある。また、日本のほかアジア地域では数多くの先進的な研究が行われているにもかかわらず、言語的な問題の

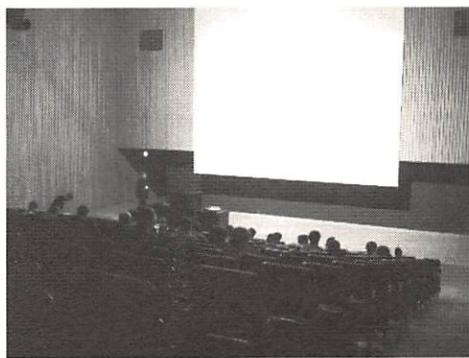
IPT/EGVE 2007

本多健二

東京工業大学

2007年7月16日～18日、ドイツのワイマールにて IPT/EGVE 2007 Workshop (10th International Immersive Projection Technologies Workshop, 13th EUROGRAPHICS Virtual Environments Workshop) が開催された。IPT Workshop は、CAVE 等、没入型プロジェクト技術に関する国際会議であり、EGVE Workshop はヨーロッパで開催されている Eurographics 主催のバーチャルリアリティに関する国際会議であるが、今回はこの二つの合同ワークショップとなった。開催場所となったワイマールのバウハウス大学はドイツ・クラシック文化の足跡を色濃く残す街の中に位置していた。

会議には12の国から約150人が参加し、有意義な議論が行われた。セッションは“Displays”, “Tracking & Measuring”, “Studies”, “Interaction”, “Image Generation”, “VR/AR System”から構成されており、41件の発表が行われた。特に IPT に特化したセッションは設けられなかったが、各セッションの中で半数程度が IPT を対象とした内容となっており、オーグメンテッドリアリティのためのディスプレイシステムといったハードウェアの提案から没入型ディスプレイのためのコンテンツ生成手法、インタラクティブデバイスの開発及びその評価、ステレオプロジェクション方式の提案、インタラクション手法の提案等について報告が行なわれた。数年前まで多く見られた、大がかりなハードウェアの提案といった内容は影を潜め、代わって AR 的な、比較的コンパクトなシステムに関する発表が多く見られたことからも、より身近で実用的な IPT が求められている傾向を表しているように感じられた。会議の2日目には Graz University of Technology の G.Pfurtscheller 氏によるキーノートトーク



IPT/EGVE2007 発表会場の様子

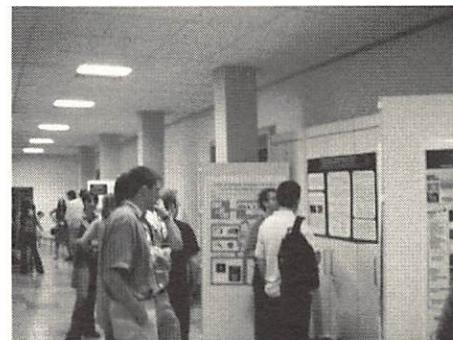
があり、BCI (Brain Computer Interface) をもちいた車椅子の制御に関する研究について現状と成果について報告され、大変興味深かった。

会場となった講堂は、図書館に併設されており約300人が収容可能であった。ロビーでは立体ディスプレイやインタラクティブデバイス等の機器が展示され、活発な情報交換が行われていた。今回、研究室のデモ展示とポスター発表は、会場とは離れた場所で軽い夕食をとりながらという形式で行われ、自由な雰囲気のなかで活発な議論が行われていた。ただ、期待していた没入型ディスプレイのような大型の装置を用いたデモ等は見学できなかったのがやや残念であった。

次回の IPT2008 はアメリカに戻る予定であり、また EGVE はオランダにて開催される予定である。両者の共同開催は非常に興味深いことから、今後も定期的に共同開催されることが期待される。

関連サイト：

<http://www.uni-weimar.de/medien/vr/ipt-egve/index.html>



IPT/EGVE2007 ポスター発表会場の様子

HCI International 2007

和田親宗

九州工業大学

2007年7月22日から27日にかけて、中国・北京において、HCI International 2007 (International Conference on Human-Computer Interaction) が開催された。二年に一度開催されており、今年で12回目になる。北京は来年のオリンピックに向かって、あちらこちらで工事が行われており、人々の表情も明るく活気のある都市であった。会場は、北京国際コンベンションセンターで、鳥の巣と呼ばれるオリンピックスタジアムのそばである。

会期前半、22日から24日にかけては、ユーザインターフェースや環境設計などに関する19のチュートリアル

と Brain Computer Interfacesに関する二つのワークショップが開催された。24日の夜には、オープニングセッションが開催され、Carnegie Mellon 大学の金出武雄教授による講演があった。金出教授は、Pittsburgh 大学とのQoLT (Quality of life technology) 研究やデジタルヒューマンプロジェクトなどを紹介され、マンマシン系においてヒトは未知で予測不可能な要素であるため、ヒトに関する研究の重要性を説いておられた。

会期後半には、パラレルセッションとポスターセッションが行われた。1日を四つの時間帯にわけ、各時間帯に約20のパラレルセッションがあり、各セッションでは6件程度の発表があった。ポスターは370件で会期中掲示していた。参加者は2300名を越えたそうである。セッションテーマは社会科学的・認知心理学的・人間工学的な研究、VRや人体モデルに関する研究、など多岐にわたっていた。発表タイトル等は、<http://www.hci2007.org/home.html> を御覧いただくとして、以下に私が興味を持った研究を二つ紹介する。一つ目は、Siena 大学のP. Marti 氏の発表で、認知症患者のリハビリ訓練をするために、触覚・視覚・聴覚を同時に刺激できしかも他の装置によって呈示パターンの変化する装置を提案していた。直径5cm程度の円柱内部にセンサ類とスピーカ・光源が内蔵されており、手で転がす早さや加速度に応じて明度や色、音の種類や大きさが変化する。この変化は無線により他の円柱にも伝えられ、相互刺激を行おうとするものである。評価実験を行っているとのことであったので、今後の成果に期待したい。二つ目は、Arizona State 大学のT. McDaniel 氏の発表で、視覚障害者に色を音声で伝える装置の開発研究である。対象物から離れると使えない、複数の色があると使えない、といった市販品の問題点を解決するため信号処理アルゴリズムを提案し、予備実験を行っていた。音声でどのように呈示するのかなど、未解決の問題はあるが、完成が待たれる研究である。

HCI では多くのパラレルセッションがあるため、聴衆

が分散し深い議論は行えない可能性はある。しかし、話題提供や異分野の情報収集を行うには最適ではないだろうか。次回は、2009年7月19日から24日、San Diego (USA)で開催される。アブストラクトの提出締め切りは2008年10月20日の予定で、詳細は <http://www.hci2009.org> を御覧いただきたい。

SIGGRAPH 2007

Papers

青木孝文

東京工業大学

日本が猛暑に見舞われる中、2007年8月5日から9日まで米国カリフォルニア州サンディエゴにてコンピュータグラフィックスとインタラクティブ技術の国際会議 SIGGRAPH 2007 が開催された。34回目を迎えた今年の SIGGRAPH は、79の国から2万4043人の参加者が集まり、33のCourses、至上最多となる108の論文(26セッション)が発表された。

毎年恒例になっているスペシャルセッション Fast-Forward Papers Preview では、2時間で全108の論文のダイジェストが発表された。この企画では、短時間でありながらも仮装あり、声色あり、飲食ありなど奇抜な方法で論文を紹介する発表者が多く、内容はもちろんのことエンタテインメント性も充実していた。

今年の Papers の特徴としては、Computational Photography、Computational Cameras といった新しい分野の論文が増え、存在感を増していた(関係する論文は2006年が16本、2007年が19本発表された)。Courses の Computational Photography では、光学系やセンサ、照明、計算機による演算処理を組み合わせることで従来のカメラには不可能であった撮影後のリフオーカスや、ブレの除去、ハイダイナミックレンジなどの映像を作り出す研究の紹介が行われた。Papers では、Anat Levinらの絞りにパターン模様を付加することによって、映像と奥行き情報を取得することを可能にするカメラの研究などが発表された。他のセッションでは、Andrew Jones らのインタラクティブ 360 度ライトフィールドディスプレイのためのレンダリングが発表され、この手法を用いたディスプレイが Emerging Technologies にて実演展示され注目を得ていた。また、Papers のセッションでは、今年から質疑応答の議論を促進するために、発表



HCI International 2007 オープニングセッションの様子

の事前もしくは発表中に論文への質問やコメントを投稿できるサイトが用意され、セッションチェアが代わりに発表者と討論するといったシステムが提供されていた。

Courses では、Spatial Augmented Reality にて、電気通信大学の稻見教授が講師を務め、Beyond Visual Augmentation というタイトルのもと五感に着目した Augmented 技術の発表が行われた。また、研究分野としても最近盛り上がりを見せる料理の分野では、Pixar が映画 “Ratatouille” を題材に食品の CG 制作手法に関して発表が行われた。

ペーパーセッションの最後に、SIGGRAPH のペーパーチェアより、SIGGRAPH / SIGGRAPH ASIA と Transaction on Graphics (TOG) の関係と論文募集について言及があった。TOG を中心に SIGGRAPH / Euro Graphics / SIGGRAPH ASIA が周りを囲むような図を見せながら、北米・欧州・アジアそれぞれで 4 ヶ月ごとに会議を行うこと、SIGGRAPH/SIGGRAPH ASIA の論文はすべて TOG の論文として収録すること、TOG の通常の論文の著者は、SIGGRAPH か SIGGRAPH ASIA のどちらか好きなほうの TOG のペーパーセッションで発表できることが発表された。また、SIGGRAPH では、レンダリングだけでなく、画像・ジオメトリに関係すれば、どんなテーマでも品質の高い論文の募集を行うと述べた。今年の Computational Photography のセッションや、ハaptic ティックなどもジオメトリと関係すれば含まれ、計算幾何学のような基礎的な論文も歓迎すると話していた。

次回の SIGGRAPH 2008 は、カリフォルニア州ロサンゼルス コンベンションセンターで、2008 年 8 月 11 日から 15 日の日程で開催される。また、SIGGRAPH ASIA 2008 はシンガポール (2008 年 12 月 10-13 日)、2009 は横浜で開催される。SIGGRAPH ASIA では SIGGRAPH と同様に Papers, Emerging Technologies, Art Gallery, Sketches, Posters といったプログラムが予定されている。詳細については SIGGRAPH (<http://www.siggraph.org/s2008/>) / SIGGRAPH ASIA (<http://www.siggraph.org/asia2008/>) の Web を参照して欲しい。

Emerging Technologies

岩本貴之

東京大学

SIGGRAPH の会場の中でも、人の賑わいが絶えず、また当学会にも深く関わりがあるのが、研究機関や企業による次世代の新技術の展示を集めた Emerging Technologies (以下、E-Tech) と呼ばれる展示セクション

である。今回の E-Tech では、展示には、従来のように公募によるものと、Chair による招待のものとがあり、全体で 34 件の展示のうち公募が 23 件、残りの 11 件が招待であった。日本からの展示は 14 件であり、全体の展示の 1/3 以上を占めていた。中でも東京大学館研究室は合計 6 件もの展示を行っていた。全体の応募数が 100 件以上であることを考えると、日本勢の健闘は相当なものである。

会場で常に人だかりが絶えなかった展示は、Microsoft によるマルチタッチインターフェース Microsoft Surface であった。来場者も自由に触ることができ、筆者も体験したが、ストレスなく扱え、完成度が非常に高い印象を受けた。マルチタッチインターフェースに関しては、同じ E-Tech 内において、JazzMutant の展示があった他、E-Tech 以外においても企業展示ブースにて Mitsubishi Electric Research Laboratory による Diamond Touch が展示されていた。昨今では iPhone も発売されたこともあり、マルチタッチインターフェースはもはや完全に available な技術となったことを印象付けられた。

展示全体の傾向としては、技術面に重点をおいた展示が多い印象を受けた。企業系では、上記の Microsoft Surface に加え、E-Ink の電子ペーパー、Holografika による裸眼立体視ディスプレイなど、すでに製品化されているデバイスも多数出品されていた。また、筑波大学岩田研究室による String Walker や東京大学館研究室による Haptic Telexistence などの先進的な研究のデモも行われていた。

一方で、大阪大学佐藤研究室・MONGOOSE STUDIO による Fuwapica Suite のようなインタラクション可能なデザイン家具、また、IVRC 作品である電気通信大学稻見研究室の BYU-BYU-View のように学生主導の作品なども見られ、製品レベルの完成度の高い展示、研究段階の先進的な技術の展示、デザインやコンセプトが斬新な展示、学生主導のアイディアあふれる展示などが、ほどよく並んだセレクションだったのではないだろうか。



SIGGRAPH E-Tech 会場の様子

● 研究室紹介



電気通信大学

電気通信学部 知能機械工学科
電気通信学研究科 知能機械工学専攻

下条・明 研究室

下条 誠, 明 愛國

1. はじめに

本研究室では、メカトロニクス、ロボティクス、VR技術に関する分野の研究を行っています。研究室には博士後期課程3名、修士課程22名、卒研生11名の合計36名の学生が在籍しています。

研究テーマとしては、触覚センシングとロボット制御、ハapticディスプレイ、人間計測そして、高精度計測に関する分野です。

以下に研究テーマの概要を述べます。

2. 研究テーマの概要

(1) すべり覚センサの開発とロボットハンドでの把持制御
人間の手指は非常に器用に動作をすることができます。このような動作をロボットハンドで実現するためには、触覚情報が必要になります。今回これまでに実用的

なセンサが無かった滑り覚センサを開発し、すべり検出を用いた把持力の調整や、触覚フィードバックによる接触力の調整などを実現しました。図1では、ハンドにすべり覚センサを取り付け、コップに水を注ぐ実験を示します。滑りを検出すると把持力を強め、コップを滑らせないよう出来るだけ小さい把持力でコップを持持できる様子を示したものです。

(2) 近接覚から触覚までをシームレスにつなぐ汎触覚センサの開発

ロボットが知的動作を行なう場合、視覚と触覚は必ず必要になる感覚と思われます。視覚は大域的状況を推定し触覚は局所的状況を確認する役割があります。特に、近距離での視覚の死角を補完する近接覚は重要な情報として、その必要性は高まる予想されます。本研究室では、この近接から触覚までを計測できるセンサを開発しました(図2)。このセンサは対象物にネットを被せるようにして取り付けることが出来ます。また、センサはアナログ回路網なので1ms程度の高速応答性があります。これによって、ラスト数cmの距離での効果的な制御方式の開発を目指しています。従来は視覚で位置を推定しても、衝突を恐れ低速度で接近するしかありませんでしたが、近接覚センサを利用することで確実に近距離に接近したことを検知できるため、より高速なアプローチ、よりソフトな接触が可能となることが期待されます。

(3) ハapticディスプレイの開発

触覚パターン提示と接触入力が可能なハapticディスプレイを開発しました。触覚提示部は1576(=32

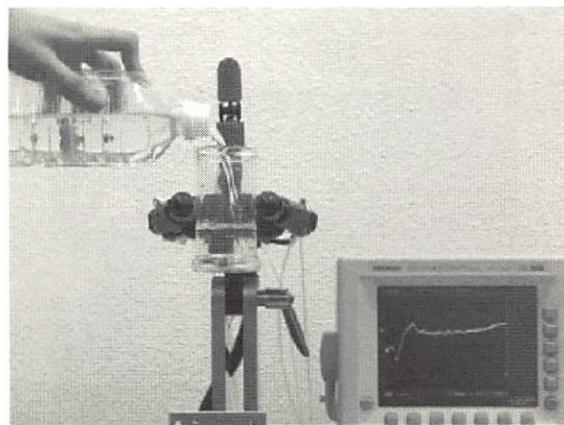


図1 すべり覚センサを用いた安定把持制御

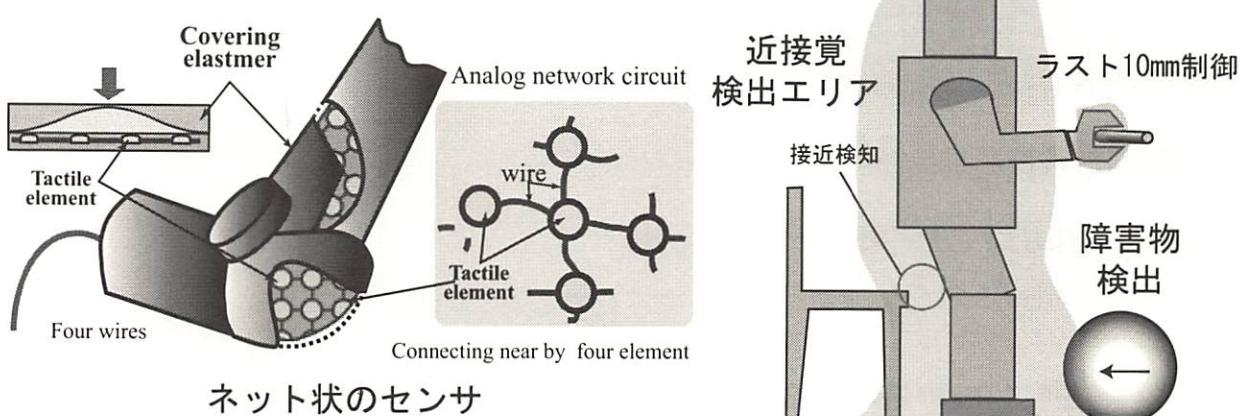


図2 ネット状の構造を持つ近接覚・触覚センサ

* 口絵にカラー版掲載

×48) 本のピンが 2.4mm ピッチで配置されたもので、PC からの制御でピンが上下することによって図形等を表示するものです(図3)。表示レートは毎秒 20 回です。また接触入力は提示面を指先で押した位置と力(3 軸力)が入力できます。この装置は、視覚障害者用の PC 用入出力装置として開発しました。これによって、パソコン操作において晴眼者がマウスを使うように、視覚障害者がアイコン操作等この装置を用いて行なうことが出来ます。現在、音情報と組合せ、見て、触れられ、触った部位の音がする新たなヒューマンインターフェースデバイスへ

の展開を計画しています。この他、布をこすりあわせる動作時に滑り振動と摩擦を提示することで、各種布地を提示できる装置等の開発も行ってきました。

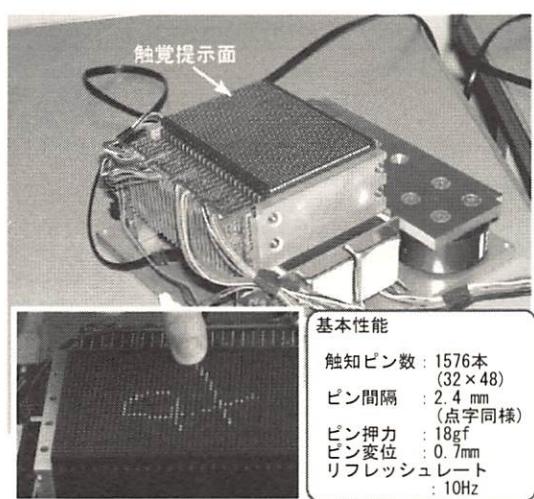
(4) 人間計測

本研究ではヒトの動作特性に関する研究を行っています。床にネット状の触覚センサを敷き歩行者の歩行データから個人識別を行う研究、そして高齢者等の歩行解析などの研究も行っています。

3. おわりに

当研究室の成果で、実用化、商品化されたものも多くあります。ロータリーエンコーダの自動校正システムや歯車の計測システムなどです。また各種センサ等も実用化が見えてきています。

またユニークな研究として楽器演奏ロボットがあります。従来ある楽器に一切の手を加えずにバイオリンやリコーダー等をロボットに演奏させるものです。こうした遊び心も大切にしていきたいと思っています。

図3 インタラクティブ機能付き触覚ディスプレイ
* 口絵にカラー版掲載

【連絡先】

電気通信大学 知能機械工学科

下条・明研究室

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

TEL : 042-443-5421 FAX : 042-443-5796

E-Mail : shimojo@mce.uec.ac.jp

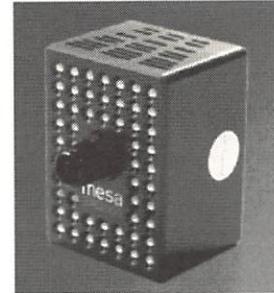
URL : <http://www.rm.mce.uec.ac.jp/>

● 製品紹介

(株)日本クラビス

SwissRanger SR3000: 光到達時間計測を用いた 奥行き計測カメラ

Thierry Oggier (mesa Imaging AG)



光到達時間計測 (TOF: Time of Flight) を用いた奥行き計測カメラ SR3000 を紹介します。本カメラは 3 次元奥行き情報をリアルタイムに計測することが出来、ロバストな障害物検出および回避、ナビゲーション、トラッキング等に応用することができます。

1. はじめに

リアルタイムのビデオ画像は近年、例えば人物の検出やトラッキング、ロボットにおける障害物検出や回避などの様々な状況で利用されています。

これらの分野における過去数十年にわたる実施例では、2 次元の白黒またはカラー動画像に対して高度な画像処理を適用し、観察対象をロバストに検出、トラッキングするアルゴリズム開発が進められてきました。こうした分野では、例えばトラッキング対象が人物の場合、その人物を高い信頼度で抽出することがプログラマに課せられた課題でした。言い換えれば、2 次元の画像情報のみを用いて 3 次元空間中にいる人物を認識するというものです。

これに対して、もし奥行きを含めた 3 次元の情報をビデオ画像と同様にリアルタイムに得られるなら、こうした課題はより容易に解けると考えられます。

SwissRange SR3000 (タイトル写真) はこの問題に対して、いわゆる光到達時間計測 (TOF : Time of Flight) を用いて対象との間の距離を計測します。三つ目の軸、すなわち奥行き情報は、正弦波状に変調した照明を用いることで取得します。反射光は距離に応じて時間遅れを生じますが、照明光と反射光の間の位相差を検出することで距離を測定することができます。この操作は 176×144 全てのピクセルで同時に出来、3 次元奥行き情報の取得は数十マイクロ秒で完了します。

2. TOF の原理

TOF の原理は以下のとおりです。システムは照明ユニット、イメージヤ用光学系、およびイメージヤ上の 25,344 ピクセルそれぞれに対する奥行き計測部からなります。

まずカメラは正弦波状に変調された照明を対象に照射します。対象物表面で反射された照明光の一部は光学系を通してイメージヤ上のピクセルに入射します。この反射光は照明光に対して、対象との距離に比例した位相遅れを持ちます。

この位相遅れは、一周期に対して 4 点のサンプリングを行うことによって一意に求めることができます。このサンプリングの様子を図 1 に示します。A0 から A3 までがサンプリング点です。この 4 点のサンプル値から位相差を求める式を次に示します。

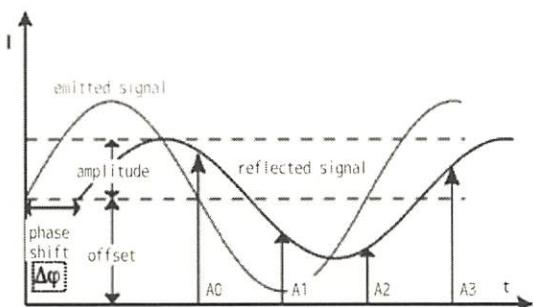


図 1 TOF の原理

$$\begin{aligned}\varphi &= \arctan\left(\frac{A_3 - A_1}{A_0 - A_2}\right) \\ A &= \sqrt{(A_0 - A_2)^2 + (A_1 - A_3)^2} \\ B &= \frac{A_0 + A_1 + A_2 + A_3}{4}\end{aligned}$$

求められた位相遅れは距離に比例するので、距離を求めることになります。

3. SR3000

このTOFの原理を用いたカメラSR3000は3次元データ、および光の強度をビデオのフレームレートでリアルタイムに出力することが出来ます。カメラのサイズは50mm×67mm×34mm、カメラインターフェースはUSB2.0で、Windows、Linux、Unixの各OSをサポートしています。

奥行き検出精度は数mmですが、対象との距離、および対象の反射特性に依存します。最大30fpsでの奥行き画像取得が可能です。

4. 応用例

リアルタイムの奥行き検出カメラSwissRangerの応用範囲は広く、既知の問題に対して全く新しいアプローチを可能とします。さらに新たな手法が可能となるだけではなく、従来の手法で非常に複雑なソフトウェアを必要としていた問題を簡略化し、結果として低コスト化することが可能です。例えば手のトラッキング、人物のトラッキング、自律移動ロボットのためのナビゲーション等は現在、画像処理を用いた研究が盛んな分野ですが、そうした分野で威力を発揮するものと期待されます。

図2は人の頭部をSR3000で取得した例です。このように正確な取得が出来るため、このデータを用いた頭部追従などのリアルタイムアプリケーションの構築は容易と考えられます。頭部追従は現在、ゲームインターフェース、障害者用インターフェース等で用いられています。

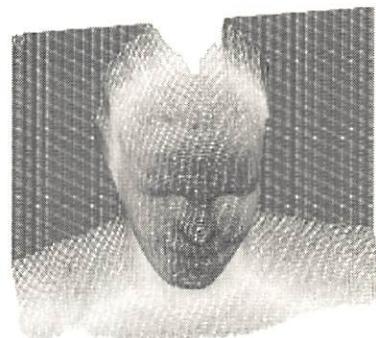


図2 頭部3次元画像取得例
*口絵にカラー版掲載

図3はSR3000によって得られた数フレームのリアルタイムデータを示しています。第一列は色によって表された奥行きデータです(青=1m、赤=6m。印刷の都合によりグレー化)。第二列は明るさ情報、つまり通常の白黒画像であり、第三列は部屋に入った人を検出し、トラッキングしている様子を表しています。

【連絡先】

総輸入販売

(株)日本クラビス

〒292-0804 千葉県木更津市文京4-5-24

Tel: 043-823-2344 Fax: 043-820-2377

Email: sales@j-clavis.co.jp

URL: <http://www.j-clavis.co.jp/>

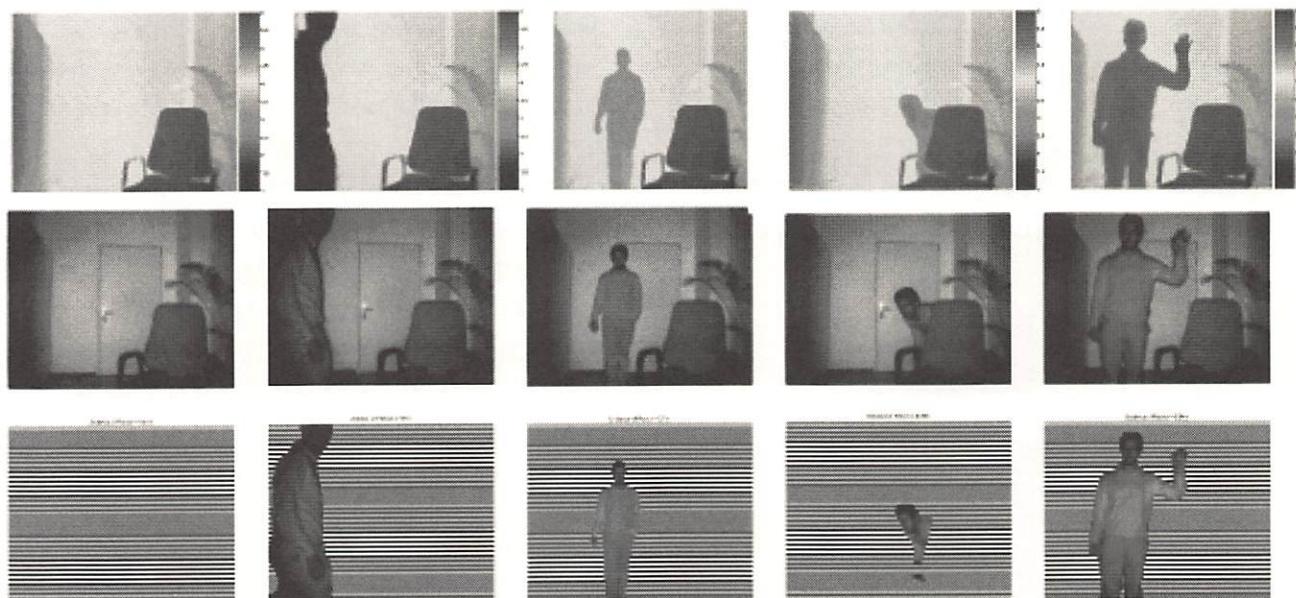


図3 トラッキングの例。第一列：奥行き画像、第二列：グレースケール画像、第三列：人物のトラッキング
*口絵にカラー版掲載

ラク楽実践 VR

- 手と足と頭を使え！VRシステムの作り方 -

様々なワイヤレスセンサネットワークが急速に考えられており、いかに簡単かつシンプルに、求められる精度でセンシングできるかが開発の鍵になっています。先日アメリカで医療用のシミュレータをいくつか見学してきました。例えば腹腔鏡の利用者への力覚情報などのフィードバックはどうやって構築したか聞いたところ、多くの医師が本物そっくりだ！と言ったそうです。感覚ですか…？ 医療の分野にも、もっと簡単で使えるセンシング技術を導入できれば、いいことがたくさんあります。そこで今回は、簡便なワイヤレスのセンサ技術のご紹介です。報告は、筑波大学の松本睦樹氏です。

山下和彦（東京医療保健大学）

第14回 小型無線加速度センサの拡張ポート による汎用無線I/O

松本睦樹（筑波大学）

ワイヤレステクノロジー社製小型無線加速度センサ (<http://www.atr-p.com/sensor01.html>) を汎用の無線I/O装置として利用してみました。この小型無線加速度センサは充電ポートに汎用の入出力ポートを持っており、簡単な電子工作を施せば標準搭載の加速度センサ以外にいろいろなデバイスを動かすことができます。具体的には入出力可能なDIOが2系統、入力のみのA/Dと出力のみのPWMが1系統ずつあり、PCからBluetooth経由でのコマンド入力で加速度を計測するのと同様に、自由に制御できます。サービス電源としても、内部電池直結の4.2Vとレギュレータを通じた3.0Vの電圧を供給できま

す。また、複数のセンサを同時に使用することができます。そして、サンプリング周期は最高5msecと高い周波数で計測することができます。

今回はA/Dにボリュームを接続し、ボリュームの変化に応じてPWMに接続したLEDの光るパターンを変化させるといったものを作成してみました。回路図は図1のようになります。

今回はWINDOWSでVisual C++6.0を用いてプログラムを作成しましたが、実際にはOSのBluetoothドライバによって、仮想COMポートでセンサ本体と繋いでコマンドをやりとりしますので、このほかにもBASICで組むこともできますし、簡単な命令だけであればTeraTermでも制御が可能です。

今回試作したLEDの点灯制御に使ったセンサの制御では、A/DとPWMのコマンドを同時に送れないため、両者の送受信のタイミングを調整せねばならず若干苦労しました。A/Dの読み込みは通信のタイミングが決まっており、タイミングが遅れるとデータがバッファに蓄積され、結果として遅延が発生したようになりました。

一方のPWMの出力はA/Dと同じ早い周期で指令を送り続けると、Hレベルから信号がスタートするためLEDが常に点灯し続ける状態になります。そこで、PWM信号の1周期分の時間おきにPWMコマンドを送信するようにしました。なお、PWM信号は次のコマンドを入力しなければ直前の指令を実行し続けるのでA/Dの値に変化があったときにコマンドを発行してもいいと思います。これらのアルゴリズムを図2に示します。

実際に完成したものが図3です。写真ではよくわからないのですが、ボリュームの変化でLEDの点滅の周

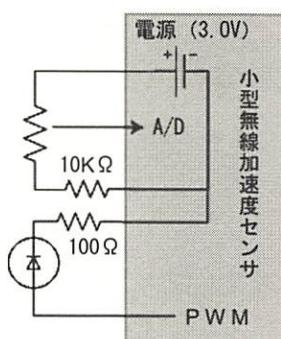


図1 回路図

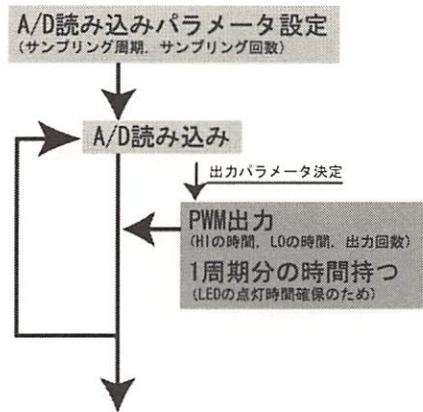


図2 制御アルゴリズム

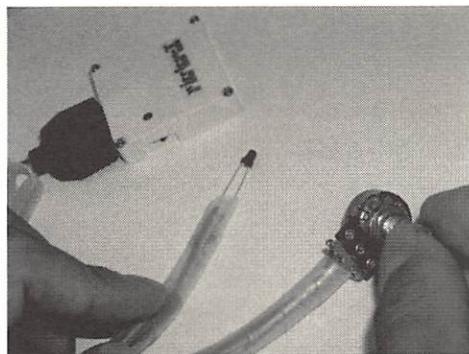


図3 完成品の動作

期を変化させることができました。ボリュームを変化させてから LED の点滅周期が変化するまで最大 1 秒の遅延 (1 周期の最大値が 1 秒) があるのですが、実際に使用してみるとほとんど違和感なく使用できました。また PWM 出力を 100 msec 程度の周期でデューティー比を変化させてやれば輝度制御にも利用できます。

今回はボリュームと LED で回路を製作しましたが、この小型無線加速度センサの拡張ポートは様々な用途に利用できると考えます。実際に私の研究室では、DIO ポートを利用して、リミットスイッチと組み合わせることで、ワイヤレスの接触センサとして利用しています。PWM ポートにトランジスタを付ければ、バイブレータを駆動したりブザーを鳴らすことも可能です。

実際に工作を行なってみて、この加速度センサの拡張性の良さを実感しました。ワイヤレスの装置を利用する際には非常に便利な装置です。

今回作成したプログラムを以下に掲載しています。

<http://intron.kz.tsukuba.ac.jp/~matsumoto/acc/accreport.html>

■寄稿募集案内

◆会議・イベント参加報告募集

本学会の会員の皆様向けの出版物における会議・イベント参加報告は、多くの学会員の皆様にご興味を持って読んでいただいている記事の一つであると思います。会員の皆様の活動範囲とご興味の拡大につれ、会議参加報告で取り扱う会議やイベントの範囲も幅広くなってきました。学会誌委員会とニュースレター編集委員会では、世界の VR に関する会議やイベントへの参加報告を広く会員の皆様から募集しております。ニュースレターでは、原則としてテキストのみ、本文 1000 字程度の報告を掲載いたしますが、学会誌では可能であれば図や写真なども付して、半ページから 1 ページ程度を掲載いたします。学会誌委員会とニュースレター編集委員会からなる会議参加報告企画委員会で検討いたしますので、国内外の学会、研究会、展覧会、展示会、今までに取り上げられなかった会議、新しく始まった会議など、本学会員の皆様の興味を引きそうなものについて、お気軽にお問い合わせをいただき、情報を寄せ下さい。なお、採用された方には、規定に従い薄謝を差し上げます。

◆留学体験記募集

学会誌委員会では、前号の Vol.12 No.2 より始まつた新企画「ワクワク留学体験記」の原稿を募集しています。これまで研究室紹介で扱っていた、留学先の研究室を、もう少しだけた感じで留学体験記をメインにご紹介いただこうという企画です。留学から帰ったばかり、もしくは留学中の学会員の皆様、ぜひ留学体験記をお寄せ下さい。

詳細については下記にお気軽にお問い合わせ下さい。なお、採用された方には、規定に従い薄謝を差し上げます。

お問合せ・寄稿先：

日本バーチャルリアリティ学会

学会誌委員会

E-mail: vrsjoffice@vrsj.t.u-tokyo.ac.jp

ワクワク留学体験記

Mitsubishi Electric Research Laboratories

MERL

橋本悠希（電気通信大学）



1. はじめに

メッセンジャーでの「MERL行く?」「良いですね」という僅か数分のやり取りにより、私はアメリカ合衆国・マサチューセッツ州・ケンブリッジに所在する Mitsubishi Electric Research Laboratories (以下 MERL) ヘインターンの学生として海外留学することになった。滞在期間は2006年10月から2007年1月までという、本来ならば修論で修羅場を迎えていたはずの3ヶ月間である。こんなにもあっさりと、しかも卒業がかかっている時期に海外留学を決めてしまって大丈夫か?という思いもあったが、海外での生活に興味があったこと、MITやHarvardなどの世界的に有名な大学が所在する場所に魅力を感じたこと、そして何よりも世界有数の研究所で学びたいという強い欲求から、とにかく行ってみることにした。

2. MERLでの研究生活

MERLとは、特にコンピュータグラフィックスや人工知能などの分野で非常に優れた成果を挙げているアメリカの研究所である。論文を通すのが最も難しい学会の一つと言われる SIGGRAPH に毎年多くの論文が採択されていると言えば、その素晴らしいところが分かって頂けるだろう。MERLでの私のボスは、インド人の Dr. Ramesh Raskar という方だった。彼はユーモアに溢れ、人柄も良く、英語の下手な私の話でもちゃんと聞いてくれる素晴らしい方だった。しかしその温厚さとは裏腹に、研究スタイルは過激という言葉が相応しかった。まず、タスクに対する期限は「today or tomorrow」。3日以上を提案するとすかさず「too slow!」である。結局、滞在の大半は深夜までの作業となり、週末もほとんど研究所に居るという状況になってしまった。もちろん Ramesh チームの他のメンバーもほとんど同じ生活である。ただし、MERL 全てがこのように研究しているわけではなく、他の研究者及びスタッフはちゃんと早く帰り、週末まで研究所に

居る人はほとんどいなかった。そんな状況だったため、よくチームメンバーと冗談半分でゲチを言い合ったり、他のスタッフやインターンの学生から励まされたりしたことを今でもよく覚えている。とにかく圧倒的なスピード感で研究が行われ、成果が積み重なっていく。これは、慣れてくるとちょっとした快感である。また、タスクはハードだがそのぶん指導は毎日行われ、疑問や問題点があればその都度議論し、必要なら他のスタッフとも相談しながら即座に解決していく。当の本人は目標に向かってひたすら進めば良く、ある意味非常に楽で快適な研究環境である。この辺りのサポートは、やはり第一線で活躍している優秀な研究者やスタッフが集まっているからこそ可能な芸当だろう。目の前で次々に問題が解決されていく様子は私にとってとても刺激的で、一種のエンタテインメントを見ているようであった。

Dr. Raskarとの議論の際によく聞かれたのは、自分の意見の優位性、正当性である。勘や何となくではダメで、しっかりとと考え、他に最善の方法は無いとアピールできなければ納得はしてくれない。常に何故その方法を取るのかの説明が求められるのである。これは、よく勘と勢いに頼って研究をしてきた私にとって、非常に良い訓練となった。また、彼から言われたこととして印象的だったのは「too much」という言葉である。余計なことは考えず、今のタスクに対して最短距離でやれ、という意味である。彼に限らず MERL では非常に合理的に物事が進められており、自分のやり方の稚拙さにハッとしたことが多々あった。

またこれは余談だが、興味深い体験が一つあった。それは、MERLでは研究活動以外の雑念が一切無くなつたことである。英語の苦手な私は、周りの会話などがなかなか把握できず、日常会話も最小限で済ませていた。それが幸か不幸か、言葉が分からぬために研究に関するのみを考えざるを得なくなり、結果的に研究に集

中する生活を送ることができた。これは、英語ベタな私にとって嬉しい副作用であった。ただし、より深いディスカッションや研究外の生活では英会話力があった方が絶対良いということは付け加えておく。

このように、MERLでの研究生活は刺激に満ちた楽しく、厳しく、感動的な体験であり、本当にいろいろと勉強になった。この体験は、今後も私の研究に大いに生かされると思う。

3. 海外生活あれこれ

今回の留学では生活面でも様々な体験があり、その中で印象に残った出来事を幾つか紹介する。まずアパートでの生活についてだが、今回の海外留学で初めてルームシェアを体験した。アメリカ、特にケンブリッジでは家賃が高いこともあり、ルームシェアはごく普通に行われているようである。私は幸いにも、研究所の近くのアパートを日本人の学生とシェアすることになった。ルームメイトとはお互い日本人ということで直ぐに打ち解け、アメリカで暮らす上での知恵をいろいろ教わった。また彼は炊飯器を持っていたため、毎日ご飯を食べることができた。このことは、慣れない海外生活を送る私にとって非常に有難いことだった。他の日本人留学生に聞いてみると、やはり食事に関する悩みは多く、食事が合わなくてホームシックになることもあるらしい。私がまったくホームシックにならずに済んだのは、きっとこの炊飯器のおかげだと思う。持つべきものは日本の友人と炊飯器である。

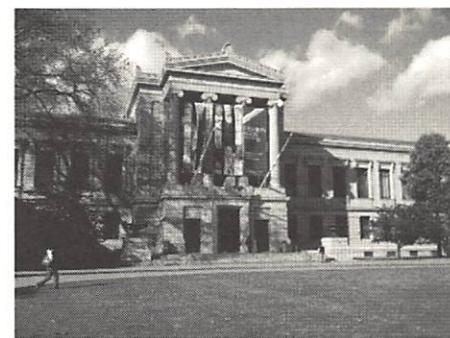
次に実生活における英語の使用頻度だが、私の実感だと思いのほか英語を使わなかった。食事や買い物は軽い挨拶とクレジットカードがあれば基本的にOKで、何か交渉する際はある程度英会話ができた方が良い程度である。ただ、アメリカはゴネた者勝ちみたいなところがあるので、交渉術は学んでおいた方が有利かもしれない。

もう一つ非常に印象的だったのは、考え方のアバウトさである。ほとんどの物事に対して日本よりもアバウトであり、特にお金の扱いに関する適当さには驚いた。例えば、買い物の際に少し多めに支払っても店によっては釣りが来ないか、戻ってくる釣りの金額が違うことが多々あった。逆に少し金額が足りないけどOKということもあった。日本の一円単位までピタリとそろえる感覚とは大分違い、最初は「え、こんなどんぶり勘定で経営が成り立つの?」と戸惑ったものだ。しかし、慣れてくると細かいことを考えなくて良いので楽になるから不思議である。ただ、このアバウトさが裏目に出ることもあり、中でも一番困ったのが宅配だった。今回の滞在中、日本から何度も荷物

を送ってもらったのだが、結局アパートで受け取ることができなかった。まず時間指定はほとんど指定できず、指定したとしてもその通りには来てくれない。私も何度か郵便局員と交渉したもの、結局全ての荷物をわざわざ郵便局まで取りに行く羽目になってしまった。荷物のロストもよくあり、学会の審査員宛てに送ったプロトタイプがロストした時は愕然としたものである。このことで、日本の郵便・運送業者の素晴らしいを思い知った。

4. おわりに

4ヶ月という短い滞在期間であったが、毎日発見があり、まったく退屈することなく過ごせた。むしろ、もっと滞在したいくらいであった。ケンブリッジという街については前回の筆者である中谷氏の記事にあるように、研究するには最適な環境である。また生活する上でも、人も良く、危険な場所も少なく、物価の高さ以外はとても住み心地の良い場所だと思う。私は卒業の時期と重なったため期間が短かったが、せっかく留学するなら最低半年は滞在するべきで、1年以上が理想だ。そうでないと、土地柄や人々の性格、文化、生活様式などを本当の意味で知ることは難しい。私の場合は期間が短く、ほぼ研究所にいたこともあって、十分に街を歩き、人々と接する事ができなかった。また冬の時期しか滞在しておらず、この街の夏を知らない。よって、断片的なケンブリッジしか見ていない。このことが唯一残念な点である。今後留学を考えている方は、ぜひ半年以上滞在し、勉強だけでなくその土地を十分に味わい、素晴らしい留学体験をして頂きたいと思う。



世界有数の規模を誇るボストン美術館
小さな街だが学術的・芸術的見所は沢山ある

【著者略歴】

橋本悠希：電気通信大学大学院・人間コミュニケーション学専攻博士後期課程1年。日本学術振興会特別研究員(DC1)。口唇部への触覚提示や光空間通信システムの研究に従事。

BOOK REVIEW

におい・香りの情報通信

外池光雄 編著

フレグランスジャーナル社 ISBN 978-4-89479-112-1 2007年発行

評者：北崎充晃（豊橋技術科学大学）

五感とは、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚を指す。本書の最初にも記されているが、視覚の研究者は非常に多く、聴覚がそれに続き、触覚になると格段に少なくなり、嗅覚、味覚に至っては、希有な存在となる。視覚研究をメインとする研究者がサブテーマとして聴覚や触覚を手がけていることが多い。その理由は様々だと思うが、なによりすでに分野の大きさが異なっているので、研究者の少ない領域は、情報入手や研究指導、成果の評価を受けるという点で最初から不利であることも大きい。また、視覚の研究はコンピュータとディスプレイ、廉価なプログラミング言語とライブラリで十分実施可能なのに対して、触覚、嗅覚、味覚などは、装置そのものを特製しなければいけない場合が多く、幅広い事前知識が必要で、費用もかかる。本書の執筆者達は、このような状況を乗り越え、匂いの研究を開拓し、推し進めてきた勇気と独創性、行動力ある先人であり、感心してやまない。

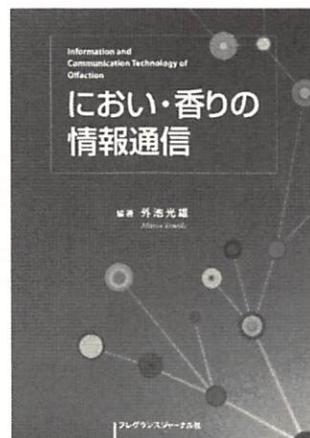
本書は、匂いにまつわる情報工学的研究を中心に、その基礎となる生化学的知見の紹介、脳科学研究の成果と装置開発、産業界での動向など、かなり広い分野をカバーしている。いわば、匂い情報処理ハンドブックとも言える編書である。特に、匂い提示装置については、一つだけではなくいくつかの方法が紹介されており、現在までの分野全体を概観することができる。匂い・香りの情報処理を研究したいが、何から手をつけていいか分からない、どのような研究がこれまであるか分からぬという読者が、最初に目を通してみる本としては最適である。匂い情報処理の偉大な先人19人が、匂い研究の入り口から最先端まで案内してくれる。そして、いくつかのトピックは、教科書・専門書という形式にとらわれすぎずに、研究や仕事のリアルな現場をダイナミックに生きしく記述しており、次の展開をわくわくしながら

読み進めることもできる。

ある意味良い特色でもあり、その反面残念な点でもあるのは、全体がきちんと編集されていないことである。頭から読み進めていくと、ばらばらな印象を受ける。短い解説論文の寄せ集めかと思ってしまうかも知れない（個々の章節は必ずしもそうではない）。それは、各著者が、お互いに制約をせずに、自由に書いているからであろう。したがって、重なる

部分もあれば、非常に類似したことを異なる表現や異なる観点から説明してある。また、短報論文のような章節もあり、論文ではない書籍としての優位性を活用していない著者もいる。こうすることで、本書は非常に新しい研究成果を生き生きと伝えることに成功しているように見える。また、ハンドブック的に興味のある章節をつまみ食いしても、それだけで完結しているのは読者にとっては便利である。全体の一貫したストーリーと執筆者それぞれの個性は相反するものであり、一概にどちらがいいとは言い切れない。個人的には、一部の章において、図の大きさやコントラスト、グレースケールにした場合に落ちる情報、説明文、図の必要性、本文との関係などに、わかりにくさがある部分は、内容の評価を落とさないまでも、不親切さを感じる。執筆者ではないエディタのレベルでもう少し補正ができればよかったのではないかと思う。しかし、それも執筆者の個性と、ときにはスピード感として読みやすさを提供しているとも思える。

最後の章にある「五感情報通信技術に関する調査研究会報告書（抜粋）」は、付録的な位置付けだが、とてもおもしろくストーリーもしっかりしている。本書によって、匂い研究が普及することのみならず、インスピレーションと勇気を得て、新しい研究領域を開拓する研究者がでることを希望する。





研究会開催についてのお知らせ

■サイバースペースと仮想都市研究委員会

委員長：岡田謙一，副委員長：小林 稔
幹事：坂内祐一，本田新九郎，渡辺喜道

[研究会ホームページ]

<http://www.sigcs.org/>

[研究会等開催予定]

●第32回研究会

開催日：2007年10月4日(木)～5日(金)
 会場：旭川市科学館サイパル(北海道旭川市宮前通東)
 共催：複合現実感研究会，電子情報通信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会
 プログラム：10月4日(木) 10:30～17:00 12件
 10月5日(金) 10:00～16:45 12件
 詳しくは研究会ホームページをご覧下さい。

●第10回記念シンポジウム

開催日：2007年11月30日(金)
 会場：筑波大学(東京キャンパス大塚地区)
 東京都文京区大塚3-29-1

テーマ：仮想都市を生きる

仮想都市を具現化したセカンドライフ等のサービスが話題を集めています。本年度シンポジウムは、原点に戻って仮想都市そのものをテーマとし、セカンドライフ、サイバースペース技術、社会学の分野から専門家をお招きし御講演をいただき、サイバースペースの中で、夢を実現し不安を克服するために、我々は何が出来るのかを議論したいと考えています。

講演者(予定)：三淵啓自(デジタルハリウッド大学院・セカンドライフ研究室)，橋元良明(東京大学)，東野輝夫(大阪大学)，竹野 浩(NTTレゾナント)，他

通常の研究会の発表の申込み締切は開催日の約45日前です。nabe@yamanashi.ac.jp(渡辺喜道)宛に以下を明記の上E-mailでお申し込み下さい。

- ・発表題目
- ・発表者名(登壇者に○)および発表者の所属
- ・概要(50字程度)
- ・発表申込者連絡先(住所，氏名，Tel., Fax., e-mail)

[問い合わせ先]

山梨大学 渡辺喜道
 Tel: 055-220-8651 Fax: 055-220-8651
 Email: nabe@yamanashi.ac.jp

■複合現実感研究委員会

委員長：横矢直和，副委員長：竹村治雄
 幹事：加藤博一，苗村 健

[研究会ホームページ]

<https://sigmr.imecmc.osaka-u.ac.jp/>

[研究会等開催予定]

●第23回複合現実感研究会

開催日：2007年10月4日(木)～5日(金)
 会場：旭川市科学館サイパル(北海道旭川市宮前通東)
 テーマ：仮想都市，複合現実感，及び一般
 共催：サイバースペースと仮想都市研究会，電子情報通信学会マルチメディア・仮想環境基礎研究会

●第6回複合現実感国際会議 (ISMAR2007)

<http://www.ismar07.org/>

開催日：2007年11月13日(火)～16日(金)

会場：奈良県新公会堂

主催：複合現実感研究委員会, IEEE Computer Society

協賛：ACM SIGGRAPH/SIGCHI(予定)

[問い合わせ先]

〒630-0192 奈良県生駒市高山町8916-5

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究所

加藤博一(SIG-MR幹事)

Tel: 0743-72-5330 FAX: 0743-72-5339

E-mail: kato@is.naist.jp

[研究会等開催予定]

●エンタテインメントコンピューティング2007(協賛)

開催日：2007年10月1日(月)～3日(水)

会場：大阪大学コンベンションセンター

主催：エンタテインメントコンピューティング実行委員会

■ VR 心理学研究委員会

委員長：伊藤裕之、幹事：北島律之

[研究会ホームページ]

<http://www.design.kyushu-u.ac.jp/~ito/VRpsy.html>

[研究会等開催予定]

●第10回研究会

開催日：12月中旬(予定)

会場：東京ミッドタウン内

デザインリエゾンセンター(予定)

新しい情報は随時、研究会ホームページでお知らせします。

■ ウェアラブル / ユビキタス VR 研究委員会

委員長：池井 寧、副委員長：広田光一

幹事：上岡玲子

[研究会ホームページ]

<http://www.cyber.rcast.u-tokyo.ac.jp/wearable/>

[研究会等開催予定]

●第4回ウェアラブル / ユビキタス VR 研究委員会

開催日：2007年11月22日(木)

会場：東京大学先端科学技術研究センター

共催：ヒューマンインターフェース学会研究会

詳細：webに掲載

<http://www.his.gr.jp/activities/meeting/read.html?045.cfp>

[問い合わせ先]

首都大学東京 池井 寧

E-mail: ikei@computer.org

■ 手ほどき研究委員会

委員長：原田哲也、幹事：小池康晴

[研究会ホームページ]

http://www.te.noda.tus.ac.jp/~harada/VRSJ_SIGET/

[研究会等開催予定]

未定

■ アート&エンタテインメント研究委員会

委員長：苗村 健

幹事：長谷川晶一、渡邊淳司

[研究会ホームページ]

<http://www.sigae.org/>

■ テレイマージョン技術研究委員会

委員長：廣瀬通孝

幹事：柴田義孝、小山田耕二、土井章男

[研究会ホームページ]

<http://www.n3vr.org/>

[研究会等開催予定]

未定



理事会だより

第 96 回理事会

平成 19 年 7 月 10 日：学士会分館

1. 各種共催・協賛・各種依頼について

- ・高臨場感ディスプレイフォーラム共催を承認.
- ・サマーサイエンスキャンプ 2007 協力を承認.
- ・「ASIAGRAPH2007 in Tokyo」共催を承認.
- ・日本 VR 医学会大会共催依頼を承認.
- ・教育システム情報学会第 32 回全国大会協賛を承認.
- ・ロボット工学セミナー第 40 回, 第 41 回協賛を承認.
- ・第 23 回ファジイシステムシンポジウム協賛を承認.
- ・医療の質・安全学会 第 2 回学術集会 案内掲載を承認.
- ・シンポジウム「モバイル 08」協賛を承認.
- ・経済産業省「サービス産業生産性向上支援調査事業」研究開発事業案内告知掲載依頼を承認.
- ・日産科学振興財団 研究助成告知掲載を承認.

2. 総務会議審議事項の確認について

- ・論文誌の英文表記の確認. 「TVRSJ」もしくは「Trans. of VRSJ」とする.
- ・総覧について、今年は名簿なしで総覧部分のみの印刷を行うこととした.

3. 第 12 回大会進行状況について

- ・大会 HP より一般発表受付を開始、7 月 3 日締切。申し込み総数は、200 件を超えていた。
- ・特別講演は、2 日目（9 月 20 日）に国立科学博物館の鈴木一義氏による「江戸期のバーチャルリアリティ（仮題）」を行う。
- ・エクスカーションとして、21 日に大宰府の国立博物

館でのスペシャルバックヤードツアーを予定。

- ・ラボツアーとして、源田研究室、竹田研究室、および 21 世紀 COE プログラム「感覚特性に基づく人工環境デザイン研究拠点」の主要設備を公開する予定。

4. ASIAGRAPH2007 in tokyo について

- ・学術的な研究発表に関する部分として Technical session 部分をオーガナイズする.
- ・先端技術展への展示者の紹介.

5. 研究委員会

- ・現在のホームページを見直し、各研究会にホームページから簡単に登録できるようなシステムを構築する.

6. 企画

- ・認定制度のテキストの章立てが出揃った.
- ・充実した内容となってきたため、認定制度にはダイジェスト版を使うこととし、別に本の出版も考慮して計画する.

7. 広報・出版

- ・ホームページの見直しも含めて、用語、出版、WEB を統括する広報委員会（仮）を設置する.
- ・上記委員会に関しての規程案ならびに、委員候補者リストが提出された.
- ・用語部門、出版部門、WEB 部門に関してはそれぞれ委員会内にワーキンググループを作つて運営する.
- ・WEB に関しては、広く意見を集めて見直しを行う予定.
- ・意見を求める方法として、アクセス解析の有効性が紹介された.



■国内会議

■エンタテインメントコンピューティング 2007

期日：2007年10月1日(月)～3日(水)

会場：大阪大学コンベンションセンター

<http://ec2007.entcomp.org/>

■ ASIAGRAPH2007 in Tokyo

期日：2007年10月11日(木)～14日(日)

会場：秋葉原 UDX

<http://www.asiagraph.jp/>

■高臨場感ディスプレイフォーラム 2007

期日：2007年11月8日(木)

会場：工学院大学 新宿キャンパス

■医療の質・安全学会第2回学術集会

期日：2007年11月23日(金)～25日(日)

会場：東京国際フォーラム

<http://qsh.jp/2007/>

■立体 Expo'07 (立体映像産業展 2007)

期日：2007年12月5日(水)～7日(金)

会場：パシフィコ横浜 展示ホール

<http://www.rittaikyo.jp/expo2007/>

■第8回国計測自動制御学会

システムインテグレーション部門講演会 (SI2007)

期日 2007年12月20日(木)～22日(土)

会場：広島国際大学広島キャンパス

<http://www.sice.or.jp/>

■シンポジウム「モバイル08」

期日：2008年7月3日(木)～4日(土)

会場：(独)産業技術総合研究所

臨海副都心センター別館11F

<http://www.mobilergo.com/symposium/2008/index.html>

■国際会議

■ISMAR 2007

6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality

Date: November 13 - 16, 2007

Place: Nara-Ken New Public Hall, Nara, Japan

<http://www.ismar07.org/>

■ ASIAGRAPH 2007 in Shanghai

Date : November 15- 17, 2007

Place: Shanghai New International Expo Centre

<http://www.asiagraph.com/>

■ ICAT2007

17th International Conference on Artificial Reality and Telexistence

Date: Nobemmmber 28-30, 2007

Place: Aalborg University Esbjerg , Denmark

<http://www.icat2007.org/>

■ IDW' 07

The 14th International Display Workshops

Date: December 5-7, 2007

Place: Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan

<http://www.idw.ne.jp/>

■ SYROCO2009

9th International IFAC Symposium on Robot Control

Date: September 10-12, 2009

Place: Nagaragawa Convention Center, Gifu, Japan

<http://www.syroco2009.org/>

■日本バーチャルリアリティ学会理事

会長 岸野文郎 (大阪大学)
副会長 野村淳二 (松下電工)
佐藤 誠 (東京工業大学)
理事 池井 寧 (首都大学東京)
石川 聰 (NTT)
岩田洋夫 (筑波大学)
伊福部 達 (東京大学)
岡田謙一 (慶應義塾大学)
小木哲朗 (筑波大学)
神部勝之 (ソリッドレイ研究所)
斎藤英雄 (慶應義塾大学)
武田博直 (セガ)
仁科エミ (メディア教育開発センター)
浜田浩行 (NHK)
原田哲也 (東京理科大学)
柳田康幸 (名城大学)
山本裕之 (キヤノン)
横小路泰義 (京都大学)
横矢直和 (奈良先端科学技術大学院大学)
吉澤 誠 (東北大学)

監事 舘 暉 (東京大学)
原島 博 (東京大学)

■日本バーチャルリアリティ学会賛助会員

株式会社 ソリッドレイ研究所
ヤマハ株式会社
旭エレクトロニクス株式会社
株式会社 日立製作所 研究開発本部
株式会社 エヌ・ティー・エス
松下電工株式会社
オリンパス株式会社
関西電力株式会社
スイートバレー推進協議会
三菱電機株式会社
リードエグジビションジャパン株式会社
キヤノン株式会社
日商エレクトロニクス株式会社
株式会社 スリーディー
ソフトキューブ株式会社
日本バイナリー株式会社
株式会社 エクサ
日本 エス・ジー・アイ株式会社
アイスマップ有限会社
株式会社 ILTJ
株式会社 JP ビジネスサービス
クリスティ・デジタル・システムズ日本支社
株式会社リアルビズ

(会員番号順)

■ニュースレターに関するお問い合わせ
E-mail : vrsjoffice@vrsj.t.u-tokyo.ac.jp

■論文誌に関するお問い合わせ
E-mail : vrsjoffice@vrsj.t.u-tokyo.ac.jp

■学会誌に関するお問い合わせ
E-mail : vrsjoffice@vrsj.t.u-tokyo.ac.jp

■ホームページに関するお問い合わせ
E-mail : www@vrsj.t.u-tokyo.ac.jp

■本誌への広告掲載に関するお問い合わせは
下記契約代理店まで

株式会社インターブックス
担当 : 松元洋一
E-mail info@interbooks.co.jp
TEL 03-5485-7544
FAX 03-5485-7545

■日本バーチャルリアリティ学会学会誌委員会

委員長 伊福部 達 (東京大学)
副委員長 横小路泰義 (京都大学)
幹事 井野秀一 (東京大学)
幹事 北村喜文 (大阪大学)
委員 矢野博明 (筑波大学)
山田俊郎 (岐阜県生産情報研究所)
清川 清 (大阪大学)
北崎充晃 (豊橋技術科学大学)
長谷川晶一 (電気通信大学)
佐藤慎一 (日本福祉大学)
茅原拓朗 (宮城大学)
野間春生 (国際電気通信基礎技術研究所)
星野 洋 (松下電工)
舟橋健司 (名古屋工業大学)
清水俊治 (諏訪東京理科大学)
渡辺哲也 (国立特別支援教育総合研究所)
梶本裕之 (電気通信大学)
西村邦裕 (東京大学)
檜山 敦 (東京大学)
島田茂伸 (東京都立産業技術研究センター)
山下和彦 (東京医療保険大学)
河合由起子 (京都産業大学)

■編集後記

野間委員が中心となって企画された特集「VRとMEMS技術」はいかがでしたでしょうか? 原稿を書いてくださった多くの先生、有難うございました。また、野間委員、お疲れ様でした。

小生が初めて仕事として携わったプロジェクトが「人間感覚計測応用技術」であり、そのプロジェクト後も人間、ヒト、認知、福祉、VR…といったキーワードのプロジェクトが多くありました。しかし近年は、そのための要素技術の開発に重点を置いたプロジェクトが多いように感じております。また、時節柄「会議参加報告」も盛りだくさんで、小生もいくつか参加させていただきました。その中で、参加したセッションだけではありますが、根本的な問題解決に目を向けた発表も多いように感じました。やはり、基礎となる技術開発に根ざした研究開発が大切であると再確認し、MEMS技術はもちろんのこと、他にも視野を広く持つてより高度な(楽しい?)VRのために、地道な技術開発にも精進しなければと戒める次第です。今後とも、皆様のご指導、ご鞭撻とご協力を賜りますようお願いいたします。

最後ではございますが、小生が委員としてお世話になって1年が過ぎて、年間を通して委員会におけるお仕事の全容をすこし分かった気になった今、上記のプロジェクトでとてもお世話になった下條先生の研究室を紹介する記事の号で、編集後記を担当させていただきとても光栄に存じ、感謝いたしております。

清水俊治(諏訪東京理科大学)

Journal of the Virtual Reality Society of Japan

June 2007
Vol.12 No.3

発行日 2007年9月30日

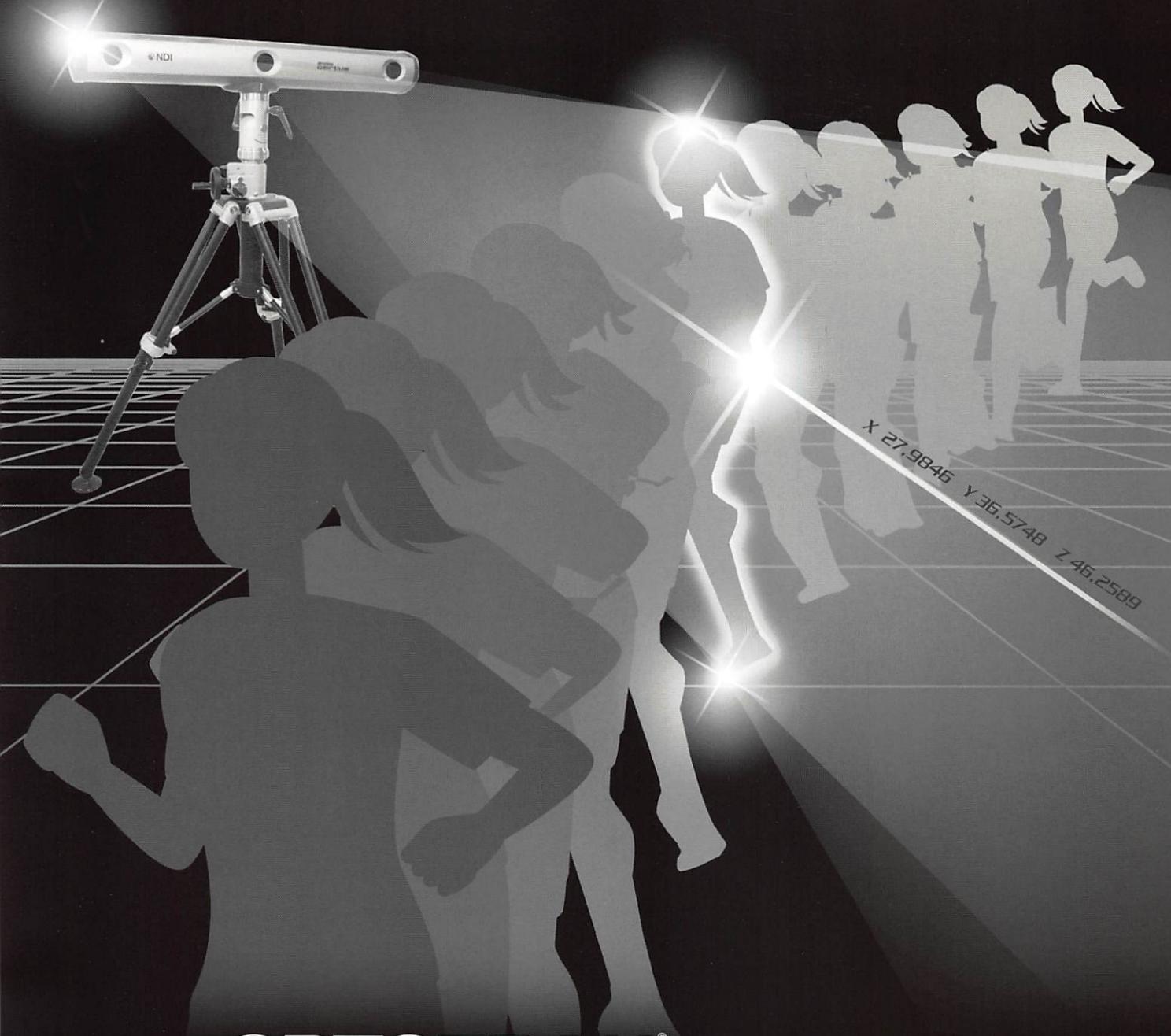
- 無断で複写・転載することを禁じます。
- 落丁・乱丁はお取り替えいたします。お手数ですが、学会事務局までご連絡下さい。

Copyright © 2007 by the Virtual Reality Society of Japan

- 発行人 特定非営利活動法人
日本バーチャルリアリティ学会
〒113-0033
東京都文京区本郷2-28-3山越ビル301
TEL(03)5840-8777
FAX(03)5840-8766
E-mail vrsjoffice@vrsj.t.u-tokyo.ac.jp
- 学会ホームページ
URL:<http://www.vrsj.org/>
- 印刷所 生々文献サービス
TEL(03)3375-8446

Think Precision

OPTICAL TRACKING SYSTEM



OPTOTRAK® CERTUS

high accuracy RMS 0.1mm

high speed 1,500Hz

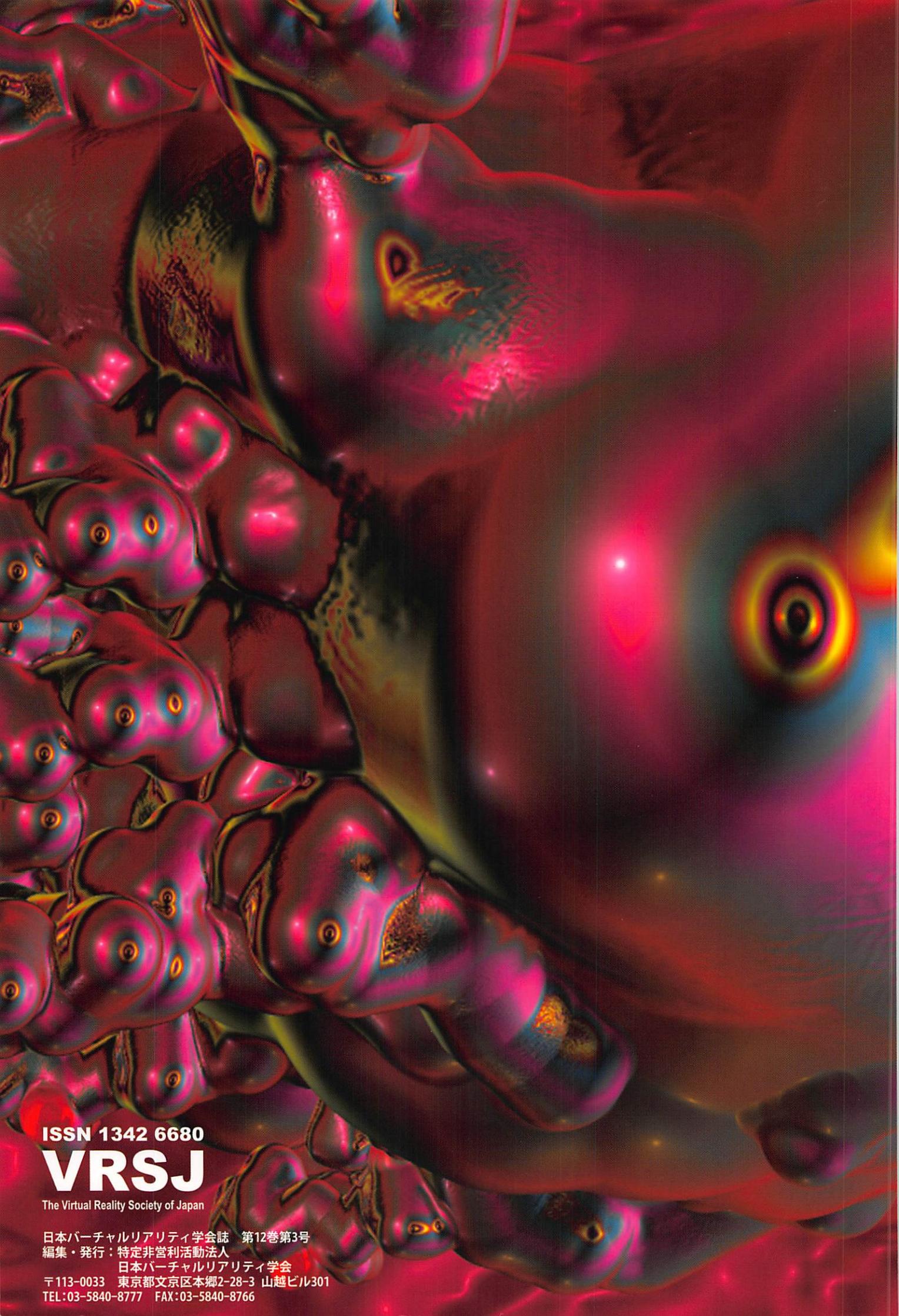
正規代理店

ADVANCED SYSTEMS CO.,LTD.
アドバンストシステムズ株式会社
〒190-0022 東京都立川市錦町2-9-7 営業部 プロダクツ営業
TEL.042-523-3290 FAX.042-524-2013
URL <http://www.asco.jp> e-mail nisitani@asco.jp

開発: Northern Digital Inc.



ADVANCED
SYSTEMS



ISSN 1342 6680

VRSJ

The Virtual Reality Society of Japan

日本バーチャルリアリティ学会誌 第12巻第3号

編集・発行：特定非営利活動法人

日本バーチャルリアリティ学会

〒113-0033 東京都文京区本郷2-28-3 山越ビル301

TEL:03-5840-8777 FAX:03-5840-8766