

石川 正俊

東京大学 情報理工学系研究科・教授

## 高速センサ技術に基づく調和型ダイナミック情報環境の構築

### §1. 研究実施の概要

本研究のねらいは、高速センサ情報処理技術に基づき、情報環境における人間や対象のダイナミクスを完全な形で取得した上で、時間密度を飛躍的に向上させた情報の提示を行うという斬新なプラットフォームを構築し、その上で人間の感覚系・処理系・運動系のダイナミクスと調和した情報環境を構築することである。平成 22 年度は、調和型ダイナミック情報環境を実現するために新たに必要となる検出系と提示系のプロトタイプ開発と、具体的なタスクを想定した人間特性モデルの構築と検証、応用システムにおける検出系と提示系のタスク評価を行った。検出系と提示系の研究開発では、世界をリードする性能を有する技術が実現されつつある。また、人間特性モデルについては、人間の動作を支援する具体的なタスクについてその効果を明らかにしつつある。さらに、応用システムの研究開発では、高速センシングによって新たに可能となるインターフェースを提案するとともに、その新しいインターフェースの枠組みで人間支援を強化する検出系と提示系の設計指標を明らかにしつつある。

### §2. 研究実施体制

#### (1) 石川グループ

① 研究分担グループ長: 石川 正俊 (東京大学情報理工学系研究科・教授)

#### ② 研究項目

##### 感覚運動統合アーキテクチャの開発と全体システムの構築

- ・ 高速感覚情報センシングの基本設計
- ・ リアルタイム感覚運動統合アーキテクチャの提案
- ・ 高速センシング技術・高速ディスプレイ技術・人間特性モデルの3つを統合する全体システムの実現

#### (2) 石井グループ

① 研究分担グループ長: 石井 抱 (広島大学大学院工学系研究科・教授)

② 研究項目

**高速視覚センシングサブシステムの開発**

- ・ 高速対象追跡・認識機能を有する小型高速ビジョンモジュールの実現
- ・ 高速運動に対するインセンシブルダイナミクスの瞬時検出に向けた高速視覚センシングシステムの開発

(3) 阪口グループ

① 研究分担グループ長: 阪口 豊 (電気通信大学大学院情報システム学研究科・教授)

② 研究項目

**情報環境と人間の調和に向けた人間特性モデルの構築**

- ・ 運動の実験計画と遂行および計測データの解析
- ・ 適応現象における誤差フィードバックの実時間性に関する実験的検討
- ・ 聴覚フィードバックによる技能獲得支援に関する実験
- ・ 身体運動の協調構造の解析

(4) 下条グループ

① 研究分担グループ長: 下条 誠 (電気通信大学情報理工学研究科・教授)

② 研究項目

**高速 2.5 次元触覚センシングサブシステムの開発**

- ・ 2.5 次元触覚センサの開発
- ・ センサ設計用光学シミュレータの開発
- ・ センサの高速化と大面積化

(5) 篠田グループ

① 研究分担グループ長: 篠田 裕之 (東京大学情報理工学系研究科・准教授)

② 研究項目

**無拘束高速触覚提示サブシステムの開発**

- ・ フェーズドアレイによる無拘束触覚提示デバイスの開発
- ・ 提示デバイスの大規模化
- ・ 超音波の放射圧制御の設計と時空間特性の検証

(6) 山本グループ

① 研究分担グループ長: 山本 裕紹 (徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部・講師)

② 研究項目

**超高速視覚情報提示サブシステムの開発**

- ・ 時間・空間マッピング処理／基本画像の事前蓄積による滑らかな動画映像表示の実現

- ・ 情報表示のラグタイムの最小化
- ・ 超高速情報表示に最適化した時空間符号の構築
- ・ セキュアディスプレイ及びパーソナライズド大画面サイネージの実証

### §3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

6つの研究項目に関して、本年度の研究実施内容を述べる。



図 1. アクティブビジョンを用いた人間の手先追跡

「高速視覚センシングサブシステムの開発」では、平成 21 年度の設計をもとに超小型高速ビジョンモジュールのプロトタイプ開発[5,24]を行った。開発したプロトタイプに対応した形で、肌色領域などに対するカラー追跡機能[23]や複数標点の高速対象追跡を可能とする多点ラベリング機能[17]などの画像処理アルゴリズムを高速化したハードウェア論理回路設計を行い、2つのカメラヘッドを用いることにより512×512画素画像に対して2000fpsでの実時間ステレオ3次元画像処理の基本動作を確認した。また画像メモリが煩雑に必要となる複雑な画像処理の高速実装に向けて、導入した高速ビジョンモジュールとGPUボードとの連動動作実験を行い、肌色領域抽出による3次元指先位置の検出を500fps以上でのフレームレートで実現できることを確認した。またアクティブビジョンに搭載されたステレオ高速ビジョンモジュールの連動動作[5,23]や1台のPCからの8台といった複数の高速ビジョンモジュールのネットワーク連動などを行い、人間の高速動作に対する実時間での追跡機能及び人間の目には見えない高速現象に対する追跡や自動記録・可視化[11,16]を両立可能であることを実験的に検証した。

「高速2.5次元触覚センシングサブシステムの開発」では、主に近接情報を検出する近接覚部について研究開発を行った。まず近接覚回路構成方式の検討として、回路シミュレータを用いて解析を行い、センサの高速応答性向上を目的として、回路パラメータとセンサ特性との関係解析と評価を行った。図2センサ回路の概念図と応答速度の実験結果を示す。図の曲線は実験値を示し $R_0=300\Omega$ で最小値約0.25msを示す。但し理論値からでは400 $\Omega$ となり、若干の相違があり更なる検討が必要であることが分かった。

また、検出エレメントについて検討を行った。近接覚の検出エレメントは、発光素子と受光素子の組合せから構成されており、検出する対象物の色・表面状態、形状等によってセンサ出力が変化する。このため対象物までの距離を示すセンサ出力は対象物依存性があり好ましくない。そこで本年度は対象物による反射変化の計測と光反射モデルの導入によるセンサ出力の補正方式について研究を行った。図3に、さまざまな紙、金属、樹脂に対する補正前と補正後のセンサ出力を示

す。実験の結果、概ね対象物までの距離とセンサ出力の対象物依存性は補正され、ほぼ 5mm 程度の誤差程度まで小さくなることが確認できた。

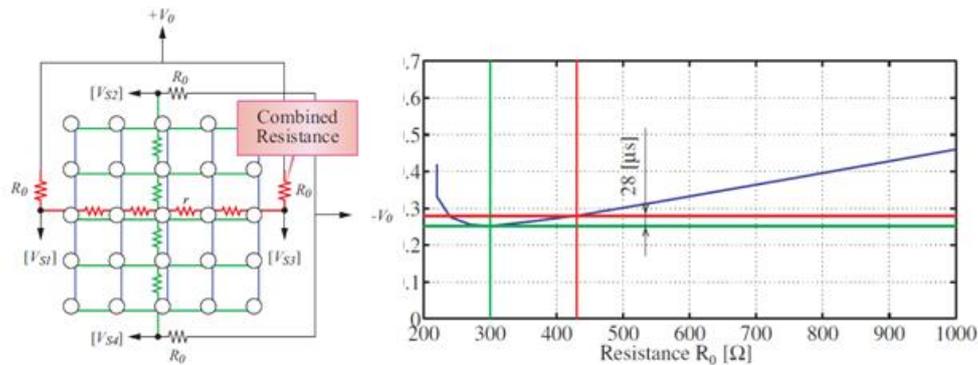


図 2. 2.5 次元触覚センサの近接覚部の構造と応答速度の評価結果

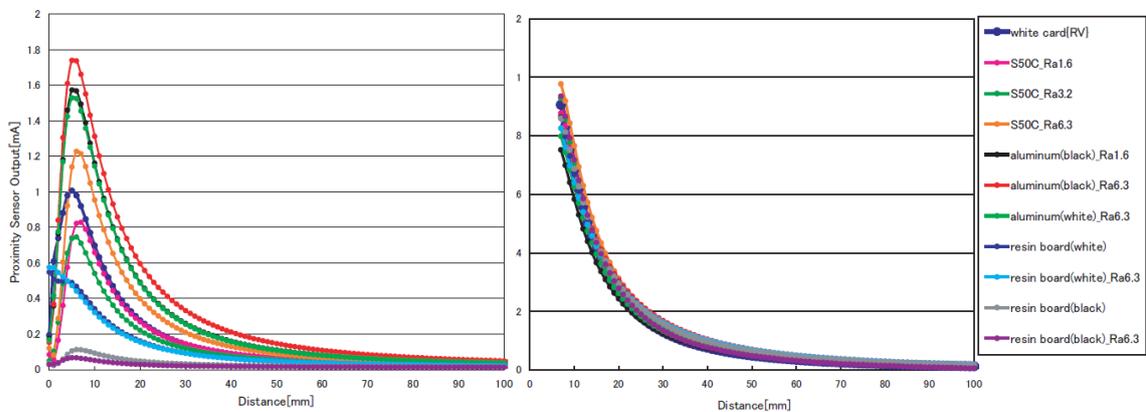


図 3. 各種対象物までの距離とセンサ出力（左：補正前、右：補正後）

「超高速視覚情報提示サブシステムの開発」では、前年度までに開発した毎秒 480 フレームの超高速 LED パネルを用いて、時空間ステガノグラフィと眼鏡無し 3D ディスプレイを実現した。時空間ステガノグラフィは観察者の知覚応答限界を超えた時間帯域の表示画面を利用する。すなわち、LED 上で 480Hz で描画される高速フレームを用いて情報画面とその補色画面を提示することで観察者には白色画面が知覚されるが、眼の前で手を振るなどアクティブな動きを行うことで情報が復号される新しいサイネージ技術を実現した。動作の様子を図 4 と図 5 に示す。3D 表示においては前年度に開発した LED パネル(画素ピッチ 20mm)に適したパララックスバリアを製作して眼鏡無し 3D を実現した。480Hz で表示される映像に上下左右の近傍画素情報を時間的に符号化することで、観察時の眼の動きによって映像の補完がなされる効果を得た。また LED を用いた立体ディスプレイに表示された映像に対する焦点調節を測定して 3m を超える長視距離においても輻輳誘導性調節が見られることを明らかにした。統合システムの準備として、映像入力中に外部信号により遅れ 2.1ms から 4.2ms で高速にプリロード画像に映像切り替えを行う LED ドライバの改良を行った。さらに複数の観察者に個別の情報を伝達する情報共有型視覚ディスプレイの設計を検討した。



図 4. 時空間ステガノグラフィで符号化された表示画面の高速(1200fps)ビデオカメラによる撮影結果. (a) 灰色背景に赤色文字, (b) 灰色, (c) 灰色にシアン色(青緑色)文字, (d) 灰色が各フレーム 2.1ms で繰り返して表示される.

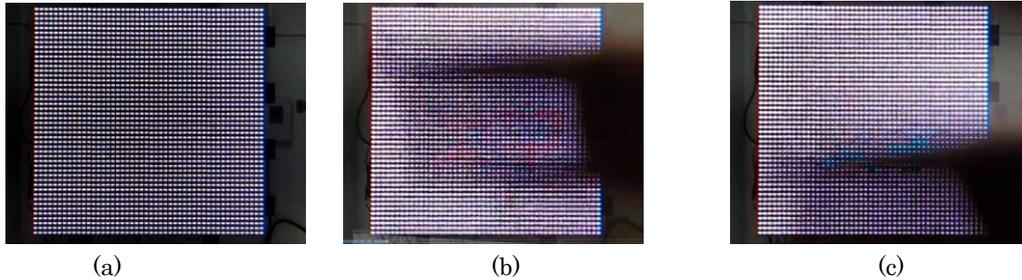


図 5. 時空間ステガノグラフィで符号化された表示画面を通常(60fps)のビデオカメラで撮影した結果. (a) 遮光物が無い場合には白色が観察される. (b), (c) ビデオカメラと LED の間で手を振る場合, 指の間で秘密情報となる文字が復号される.

「無拘束高速触覚提示サブシステムの開発」では、超音波の放射圧を用い、人間を拘束することなく、運動中の人間の任意の部位に、非接触で触覚情報を提示するデバイスの実現に向けて、本年度は、分散配置して開口合成可能な超音波触覚ディスプレイの実現方法を確認し、その構成要素となる超音波アレイユニットを複数台試作した。試作したシステムの写真を図 5 に示す。各ユニットは 16×16 の稠密なフェーズドアレイからなる。それぞれのユニットが FPGA を搭載しており、PC から送信される収束点(焦点)の 3 次元座標を全ユニットが共通に受け取る。各ユニットの FPGA は、ユニット内の素子から放射された波動の位相が、焦点位置で全て揃うように駆動タイミングを計算し、駆動信号を生成する。今回の試作では、各素子の位相の設定精度を 4 ビット(22.5°)、焦点位置更新頻度を 2kHz とした。各ユニット単体での動作を確認したのち、4 ユニートを結合した図 6 の試作システムにおいて超音波の収束を確認した。

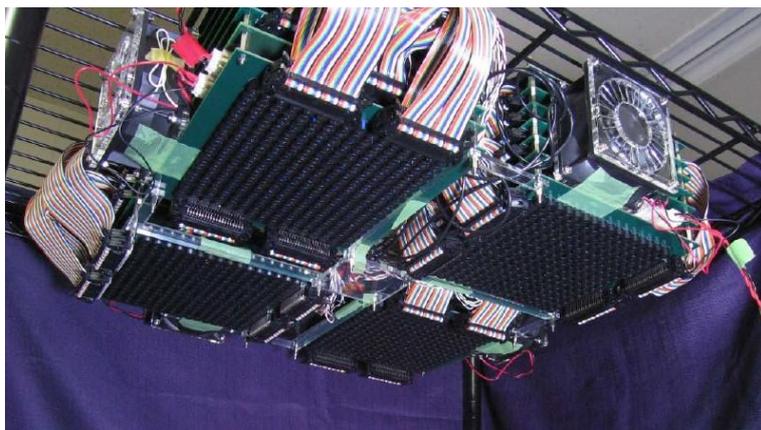


図 6. 4 ユニットで構成したフェーズドアレイの写真

「情報環境と人間の調和に向けた人間特性モデルの構築」では、人間特性モデルの構築に向けて、運動学習における適応ゲインの特性の検証、身体運動の可聴化システムの開発、および、身体運動の統計的解析手法の開発を行った。運動学習における適応ゲインの特性の検証では、

運動学習を促進するためにはどのタイミングで誤差情報を受け取ればよいのかを検証した。運動そのものの終了時刻と運動課題の終了時刻を分離できる仮想投てき運動を用いて、どちらのタイミングでフィードバックが与えられれば適応ゲインが大きくなるか調べた。その結果、身体運動終了と課題終了の両方において、それぞれ適応ゲインが大きくなる傾向が見られた。

身体運動の可聴化では、本来、音として聞くことの出来ない身体運動を可聴化することにより、ふだんはあまり明確に知覚できない身体の動きをより明確に知覚させるという新しい方法論を提案した。具体的には、眼球運動、フリスビーの投てき、書道の筆遣い、歩行運動などの対象として可聴化を行った。例えば、書道の筆遣いに関しては、習熟者と初心者の筆への力の入れ方を音の違いとして表現することに成功した[25]。

身体運動の統計的解析手法の開発では、ヒトの複雑な身体運動をより単純な成分に分解する新しい方法を提案した。これまで提案されていた方法では、身体運動を二次元平面上に縮約することにより解析が行われてきたが、ヒトのほとんどの運動は二次元に縮約することはできない。本研究では、三次元空間の任意の運動を解析できる統計的手法の開発を行った。

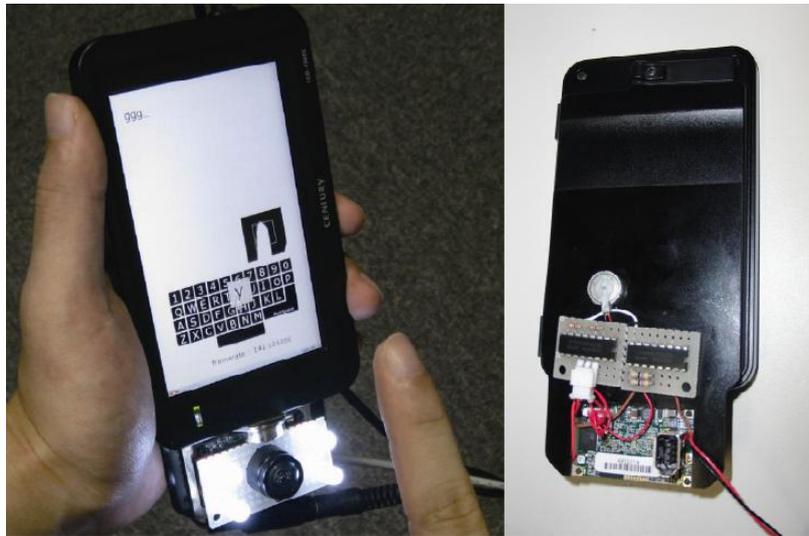


図 7. 触覚提示を搭載した空中タイピングインターフェース

「[感覚運動統合アーキテクチャの開発と全体システムの構築](#)」では、まず、前年度に試作した応用システムのプロトタイプ「空中タイピングインターフェース」について、情報提示と操作特性の評価を実施した。具体的には、試作したプロトタイプに新たに触覚提示装置を搭載したシステムを開発した[13]。加えて、同インターフェースで触覚提示や視覚提示の条件を制御した場合の操作特性について検証した。その結果、触覚提示や視覚提示の高速化が操作向上に寄与することが分かった。合わせて、新しい身体動作や難しい身体動作を実施する場合に、ユーザを支援する応用システムの設計指標を立てるために、視覚提示を介した感覚フィードバックによる身体動作の特性を検証した。検証のために、注目する身体部位の 3 次元位置を高速に捉えるセンシングシステムと、低遅延で情報をユーザにフィードバックするための提示システムを構築した。構築したシステムを用いた検証を実施し、センシングとディスプレイの高速化が動作タスクの強化に有効であることを明らかにしつつある。

#### §4. 成果発表等

##### ① (4-1) 原著論文発表

##### ● 論文詳細情報

- 1) Makoto Shimojo, Takuma Araki, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa: A High-Speed Mesh of Tactile Sensors Fitting Arbitrary Surfaces, *IEEE Sensors Journal*, 10,4, pp.822-830,2010. (DOI: 10.1109/JSEN.2009.2034982)
- 2) Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda: Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp.155-165, 2010 (DOI:10.1109/TOH.2010.4)
- 3) Takehiro Niikura, Yuki Hirobe, Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa: 3D Input Interface for Mobile Devices, 12th Virtual Reality International Conference (VRIC 2010/Laval Virtual) (Laval, 2010.4.7-11) / Proceedings, pp.297-298.
- 4) Kei Nakatsuma and Hiroyuki Shinoda: High Accuracy Position and Orientation Detection in Two-Dimensional Communication Network, *Proc. CHI 2010 (28th ACM Conference on Human Factors in Computing Systems)*, Atlanta, USA, pp. 2297-2306, April 10–15, 2010.
- 5) Idaku Ishii, Tetsuro Tatebe, Qingyi Gu, Yuta Moriue, Takeshi Takaki and Kenji Tajima : 2000 fps Real-time Vision System with High-frame-rate Video Recording, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1536-1541, 2010.
- 6) Hiroaki Hasegawa, Yoshitomo Mizoguchi, Kenjiro Tadakuma, Aiguo Ming, Masatoshi Ishikawa, Makoto Shimojo: Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010),pp.777-784, Anchorage, AK, USA, 3-8 May 2010.
- 7) Seiichi Teshigawara, Kenjiro Tadakuma, Aiguo Ming; Masatoshi Ishikawa, Makoto Shimojo: High Sensitivity Initial Slip Sensor for Dexterous Grasp, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010), pp.4867-4872, Anchorage, AK, USA, 3-8 May 2010.
- 8) Zhaoxian Xie, Manabu Yamashiro, Hisashi Yamaguchi, Aiguo Ming and Makoto Shimojo: Development of A Mobile Manipulator System With RFID-Based Sensor Fusion For Home Service: A Case Study on Mobile Manipulation of Chairs, *International Journal of Information Acquisition*, Vol. 7, No.1, pp.1-13(2010.6)

(DOI: 10.1142/S0219878910002026)

- 9) Yasuaki Monnai and Hiroyuki Shinoda, "Microwave Phased Array Sheet for Wireless Sensor Network," Proc. 7th International Conference on Networked Sensing Systems, pp.123-129, Kassel, Germany, June 15-18, 2010.
- 10) Hisashi Yamaguchi, Zhaoxian Xie, Aiguo Ming, Makoto Shimojo: Human assist by a mobile manipulator with high speed tactile sensor, Proceedings of the 2010 International Conference on Information and Automation (ICIA 2010) , pp.765-70, Harbin, China, 20-23 June 2010.
- 11) Idaku Ishii, Yaodang Wang and Takeshi Takaki : An Intelligent High-Frame-Rate Video Logging System with Real-Time Image Processing at 1000 fps, Proc. 2010 IEEE Int. Conf. on Multimedia & Expo, pp. 861-866, 2010.
- 12) Shigenobu Shimada, Haruka Murase, Suguru Yamamoto, Yusuke Uchida, Makoto Shimojo, Yutaka Shimizu: Development of Directly Manipulable Tactile Graphic System with Audio Support Function, Computers Helping People with Special Needs. 12th International Conference, ICCHP 2010, Vol.2, pp.451-458, Vienna, Austria, 14-16 July 2010.
- 13) Takehiro Niikura, Yuki Hirobe, Alvaro Cassinelli, Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa: In-air Typing Interface for Mobile Devices with Vibration Feedback, ACM International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2010) (Los Angeles, 2010.7.25-29) / Proceedings.
- 14) Masafumi Takahashi, Hiroyuki Shinoda: Large Aperture Airborne Ultrasound Tactile Display Using Distributed Array Units, Proc. SICE Annual Conference 2010, pp.359-362, Aug., 2010, Taipei, Taiwan.
- 15) Hirotsugu Yamamoto, Tomoya Kimura, Shinya Matsumoto, and Shiro Suyama: Viewing-Zone Control of Light-Emitting Diode Panel for Stereoscopic Display and Multiple Viewing Distances, Journal of Display Technology, vol. 6, No. 9, pp. 359-366, 2010 (DOI: 10.1109/JDT.2010.2052453).
- 16) Yaodong Wang, Takeshi Takaki, and Idaku Ishii : Intelligent High-Frame-Rate Video Recording with Image-Based Trigger, Proc. Int. Symp. on Robotics and Applications, Paper no.: ISORA-150, 2010.
- 17) Qingyi Gu, Takeshi Takaki, and Idaku Ishii : 2000-fps Multi-Object Extraction Based on Cell-Based Labeling, Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, pp.3761-3764, 2010.
- 18) 山本裕紹, "液晶パネルを用いたセキュアディスプレイ", 液晶, Vol. 14, No. 4, pp. 255-262, 2010.

- 19) 溝口善智, 多田隈建二郎, 長谷川浩章, 明愛国, 石川正俊, 下条誠, 近接・触・すべり覚を統合したインテリジェントロボットハンドの開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.46,No.10,632/640,2010.
- 20) Seiichi Teshigawara, Satoru Shimizu, Takahiro Tsutsumi, Yosuke Suzuki, Aiguo Ming, Makoto Shimojo, Masatoshi Ishikawa: High Sensitivity Slip Sensor Using Pressure Conductive Rubber for Dexterous Grasp and Manipulation, 2010 Ninth IEEE Sensors Conference (SENSORS 2010) ,pp.570-4, Kona, HI, USA, 1-4 November 2010.
- 21) Hasegawa, Y.; Ohishi, C.; Fukumori, M.; Chunquan Xu; Aiguo Ming; Shimojo, M., Motion planning for vertical jumping by a small humanoid with structural joint stops, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) ,pp.691-696,2010, Tianjin, China, 14-18 December 2010.
- 22) H. Yamamoto, K. Kajimoto, and S. Suyama, "Secure display with head-tracking viewing zone," IDW'10 (The 17th International Display Workshops) , Fukuoka, Dec. 2, 2010.
- 23) Idaku Ishii, Tetsuro Tatebe, Qingyi Gu, and Takeshi Takaki : 2000 fps Real-time Target Tracking Vision System Based on Color Histogram, Proc. SPIE-IS&T Electronics Imaging 2011 meeting, Vol.7871, 787103, 2011.
- 24) Yao-Dong Wang, Idaku Ishii, Takeshi Takaki, and Kenji Tajima : An Intelligent High-Frame-Rate Video Logging System for Abnormal Behavior Analysis, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.1, pp.53-65, 2011.
- 25) Naoyuki Hori, Hiroyuki Arita and Yutaka Sakaguchi, "Audiolizing Body Movement: Its Concept and Application to Motor Skill Learning, Proceedings of the 2nd Augmented Human International Conference, No. 13, 2011 (doi: 10.1145/1959826.1959839)
- 26) H. Yamamoto, M. Tsutsumi, R. Yamamoto, K. Kajimoto, S. Suyama: Development of high-frame-rate LED panel and its applications for stereoscopic 3D display, Photonics West 2011, Jan. 27, 2011, San Francisco, CA, USA.
- 27) T. Sonoda, H. Yamamoto, and S. Suyama: A new volumetric 3-D display using multi-varifocal lens and high-speed 2-D display, Proc. SPIE, vol. 7863, 786322, 2011 (DOI: 10.1117/12.873305)
- 28) H. Yamamoto, M. Tsutsumi, K. Matsushita, R. Yamamoto, K. Kajimoto, S. Suyama: Development of high-frame-rate LED panel and its applications for stereoscopic 3D display, Proc. SPIE, vol. 7956, 79560R, 2011 (DOI: 10.1117/12.874702)
- 29) Yasuaki Monnai and Hiroyuki Shinoda: Focus-Scanning Leaky-Wave Antenna

with Electronically Pattern-Tunable Scatterers, IEEE Transactions on Antennas and Propagation. (in press).

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 1 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件)