

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23240015

研究課題名(和文) 極小センサノードを用いたリアルタイム3次元モデリングインタフェース iClay

研究課題名(英文) iClay: A 3D real-time modeling system with tiny sensor nodes

研究代表者

橋本 昌宜 (Hashimoto, Masanori)

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：80335207

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,700,000円、(間接経費) 11,010,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は3次元形状の直感的モデリングにむけて、粘土内に大量の微小無線給電センサノードを埋め込んだリアルタイム形状認識システムiClayの実現に取り組んだ。本システムは、ノード間距離情報から各ノードの3次元相対位置を推定し、物体の形状を認識する。iClayの実現に向けて必要な要素技術であるノード間距離見積もり法、超小型無線アンテナ、無線給電方式、ならびにノード位置推定を完成させ、応用利用の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：This project aimed at actualizing real-time 3D modeling system called iClay. This modeling system that uses a sensor network distributed many cubic-meter-class sensor nodes in plastic clay. The distributed sensors sense distances between them, and the sensor network collects the distance information for recognizing object shape by calculating relative positions of nodes based on the collected node-to-node distances. We developed fundamental element technologies for iClay actualization, which were node-to-node distance estimation, cubic-meter antenna, wireless power transmission and node localization, and investigated potential iClay applications.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 メディア情報学・データベース

キーワード：3次元モデリング センサネットワーク リアルタイムモデリング 極小センサノード

1. 研究開始当初の背景

ユーザインタフェース

人間とコンピュータの直感的なインタラクションを目指して、操作対象としてマウスやキーボードではなく実物体を用いる様々な研究が行われてきた。

研究分担者が開発した ActiveCube は CPU が内蔵された一辺 5cm の立方体のブロックである。ActiveCube は、ブロックの接続時にブロックとホスト PC が通信し、組み立て形状をリアルタイム認識するため、一般に困難な 3 次元形状モデリングを容易に行うことができ、子供向けのインタラクティブな積み木遊びツールなどへ応用されている。また、操作の容易性・直感性を活かした応用展開として、脳の認知能力評価ツールがあり、これまでにアルツハイマー病の早期診断や子供の発達性協調運動障害診断に有効であることを明らかにしてきた。

しかし、一つあたり 80g の質量と一辺が 5cm というサイズから、形状表現能力が 10 個程度のブロックで表現できる形状に限られている。このため、工業デザイン分野への展開や子供の粘土工作によるごっこ遊びの支援、お年寄り向けの医療ツールの実現に供することは難しい。

工業デザインの分野では、CAD などによって 3 次元形状モデリングした仮想物体を、3 次元プリンタなどを用いて実際にプロトタイプピングし、デザインや機能の有効性を検証する。一般に初期形状がそのまま製品に採用されることはなく、コンピュータ上でのモデリング修正に立ち戻り、再度プロトタイプピングを行う、というループが繰り返されている。これは単にデザイン完成を遅らせるだけでなく、よりよい形状を思索するデザイナーの創造的な思考を阻害し、効率を低下させる問題もある。一方、クレイモデルなど用いてデザイナーが 3 次元物体形状を実現し、3 次元スキャナを用いて形状データをコンピュータに取り込む手法も用いられている。非同期な形状入力には適しているが、インタラクティブな形状入力インタフェースには適さない。

このように、実物体を用いたリアルタイム詳細形状モデリングが実現できれば、工業デザインの効率の飛躍的な向上が期待でき、リアルタイムインタラクションを活用した創造性を高める教育や、さらにはアルツハイマー病や発達性協調運動障害の早期診断・リハビリ医療などへの展開も期待できる。特に脳障害の早期診断は患者の QOL の確保に大きく関わってくるものが考えられ、高齢化社会を迎えようとしている我が国に必須の技術であると考えられる。

センサノード

環境モニタリングや流通追跡、災害の障害報告などの幅広いアプリケーションを実現するインフラとして、センサネットワークが盛んに研究されている。センサネットワークはセンサノードと呼ばれるセンサとプロセッ

サ、通信回路からなる集積デバイスで構成され、センサノード間がアドホックネットワークなどで接続される。センサノードは設置容易性から電池駆動が多いが、さらに電池交換が不可能なアプリケーションへの展開するため、光、熱、振動、電磁波といった環境エネルギーを取り出す技術や無線電力送電が盛んに研究されている。

研究代表者の研究グループでは、超低電力センサノードを実現する技術として、集積回路を MOS トランジスタの閾値電圧よりも低い電源電圧で動作させるサブスレッショルド回路に注目し、センサノード向けプロセッサの開発とその設計技術の研究を推進してきた。0.46V の電源電圧で 3.47pJ/cycle のエネルギー効率を 65nm プロセスで試作した 16-bit RISC プロセッサで達成した。

2. 研究の目的

コンピュータを用いた 3 次元形状のモデリングは、一般に 2 次元ディスプレイ上でペンタブレットやマウスなどを用いて行われるため、直感的に形状を把握しづらく、操作も容易ではない。3 次元プリンタ等でプロトタイプピングして評価・検証する場合、物体形状の修正は直感的に行うことが出来ず、コンピュータ上でのモデリング修正からやり直す必要がある。一方、クレイモデルで物体形状を作成し、3 次元スキャナで形状データを取り込む手法も用いられているが、インタラクティブな形状入力には適さない。本研究では、体積が 1mm³ 級のセンサノードを開発し、これを多量に埋め込んだ実世界オブジェクトを変形させることで、直感的かつ容易に 3 次元形状をリアルタイムモデリング可能な実世界指向ユーザインタフェース iClay(図 1) を提案するとともに様々な分野への応用を検討する。

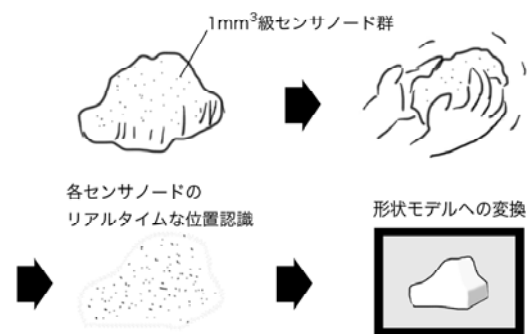


図 1: iClay の構想

3. 研究の方法

研究開始時に、研究代表者、研究分担者らで iClay 実現に必要な要素技術として、無線通信、距離測定、形状認識、無線給電が重要であり、それぞれを橋本と廣瀬が担当することにした。さらに iClay 実現時の応用展開を伊藤が検討することとした。また、研究代表者、

研究分担者ならびに研究協力者と定期的に物理的に会合を開き、課題と成果を共有して研究を進めた。

距離測定(橋本)

iClay の実現にはセンサノードの位置取得が必要となる。本研究ではノード間の距離情報を元にノード位置を推定することとしたため、ノード間距離を測定する手法の開発が必要となった。

無線通信(橋本)

上で測定した距離情報をホスト PC に無線送信し、ホスト PC で形状認識を行う。この目的のため、特に無線通信の性能に重要な要素で小型化が難しいアンテナの評価・開発を行うこととした。

形状認識(橋本)

測定し、無線でホスト PC 上に収集されたノード間距離情報から、ノードの相対位置を推定して、粘土形状を再現する手法を開発する必要がある。

無線給電(廣瀬)

iClay では無数の超小型センサノードを用いるため、バッテリー交換が不可能である。無線で各センサノードに電力を供給する必要があり、その技術を開発することにした。

応用検討(伊藤)

iClay には医療や教育などの分野などで潜在的な応用が考えられる。どのような応用が可能かを検討することにした。

4. 研究成果

上で述べた各研究要素について研究成果を報告する。

距離測定

まず、iClay に適した粘土として、可塑性と耐久性に優れた樹脂粘土を選定し、その基本特性として誘電率を測定した。得られた誘電率等の電気的特性は、本研究全体で共通に使用した。

静電容量結合を利用した距離推定手法を提案した。センサノード電極間の結合容量に注目し、その距離による値の変化を伝送パルス振幅で推定する手法を考え(図 2)。提案手法の実現のため、ノード間に信号の伝搬に利用される静電容量結合を発生させる二枚一組の対のセンサ電極に焦点を当て、電磁界解析を使ったシミュレーションから、その性能変化傾向を調査し電極設計の指針を示した。電極の利得を最大化するには、対の電極を対称とすることが重要ということが分かった。電極の指向性による距離推定誤差は、対の電極においては形状や寸法に対する依存性が小さいことも明らかになった。

また、間欠的なパルス振幅測定に適した非同期アナログデジタル変換回路を開発した。振幅の局所最大値、局所最小値をサンプリングする方式を考え、その消費電力低減効果を実

験的に評価するとともに、信号波形の再現方法も検討した。

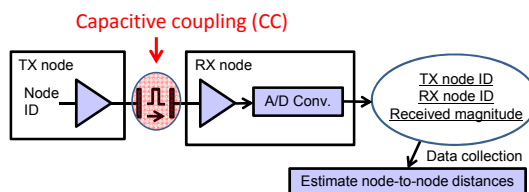


図 2: 静電容量を利用した距離測定法

無線通信

本研究では粘土モデル中に配置した 1mm³ 級の共振型アンテナの電磁界シミュレーションをおこない、その S21 特性や複数配置による S11 への影響、電磁界分布について評価した。

シミュレーションの結果、小さい電力で動作させることを考える場合、コイルアンテナが平面スパイラルアンテナよりも有効であるとわかった(表 1)。周波数が 340MHz で 2mm から 5mm の距離範囲において、コイルアンテナは 10dB 以上良い S21 を得た。具体的な S21 の大きさは、-13.9dB (2mm), -24.1dB (3mm), -31.5dB (4mm), -37.4dB (5mm) であった。コイルの構造により S21 特性が変化することから、最適な構造設計を進めることで、S21 の向上が期待できることもわかった。

表 1: コイル S21 シミュレーション結果

距離	コイル 間隔: 0.05mm S21 [dB]	コイル 間隔: 0.1mm S21 [dB]	コイル 間隔: 0.2mm S21 [dB]	平面スパイラル アンテナ S21 S21 [dB]
2mm	-14.2@ 340MHz	-13.9@ 339.7MHz	-16.3@ 339.1MHz	-24.4@ 341.5MHz
	-25.1@ 340.1MHz	-24.1@ 340.1MHz	-25.1@ 339MHz	-35.5@ 341.7MHz
3mm	-32.8@ 340.1MHz	-31.5@ 339.8MHz	-31.9@ 338.8MHz	-43.3@ 341.7MHz
	-38.7@ 339.9MHz	-37.4@ 339.3MHz	-37.4@ 339.2MHz	-49.3@ 341.8MHz

形状認識

3次元形状認識システム向けノード間距離情報に基づいた3次元ノード位置推定手法を検討した。距離情報には大きな距離測定誤差が含まれていること、推定するノードが多数あることから、ロバスト性を考慮した逐次的推定手法を適用した。推定精度に関して、多辺測量と最尤推定を比較し、分散が大きい平均では多辺測量の方が、精度が良いことを示した。また距離測定誤差が推定精度に大きな影響を与えることを明らかにした。

無線給電

iClay に向けたワイヤレス給電技術に関する検討を行った。本研究では、受電アンテナとして、直径 1mm のコイルの利用を想定して検討を行った。電磁界シミュレーションにより、ショートタイプのヘリカル構造とした。さらに、整流回路として差動型の動的なしきい値補償機能を持った、高効率な差動型整流回路を検討した。数値計算による性能評価を行っ

た結果、数 $10 \mu\text{W}$ 程度の電力が得られることを確認した。

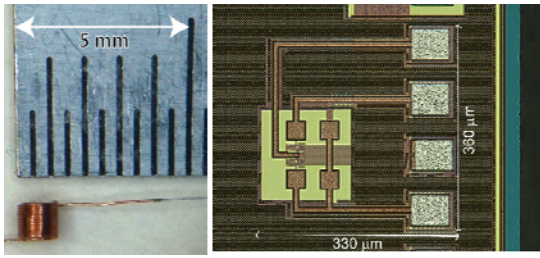


図 4: 直径 1mm の小型受電アンテナとオンチップ差動型整流回路のチップ写真

図 4 に直径 1mm の小型受電アンテナの構造とオンチップ差動型整流回路のチップ写真を示す。小型アンテナの直径は 1mm であり、差動型整流回路の面積は 0.12 mm^2 であった。図 5 に、受電アンテナと整流回路を用いた受電実験の動作波形を示す。受電アンテナで受けた交流信号を、約 766 mV の直流電圧に整流できることを確認した。さらに、製作した送受信アンテナと整流回路チップを用いて給電実験を行い、超小型ワイヤレス給電技術により微小電力を伝送できることを確認した。図 6 に負荷抵抗を変化させた際の出力電力の測定結果を示す。入力信号源のインピーダンスをパラメータとして測定を行った。信号源インピーダンスが 35Ω のとき、最大 $17 \mu\text{W}$ の電力が得られることを確認した。



図 5: ワイヤレス給電実験の出力電圧波形

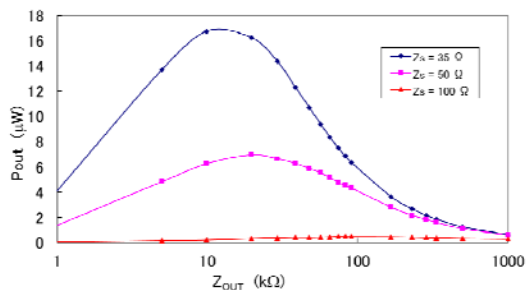


図 6: 静電容量を利用した距離測定法

応用検討

iClay のための柔らかいユーザインタフェースデバイスのための通常のタッチインタラクションとは異なる「こする」「たたく」「つ

まむ」などの操作を取得するためのプロトタイプデバイスの実装と性能評価を実施した。粘土と同様に柔らかい物体として風船を用い、ユーザによるインタラクション識別アルゴリズムを考案した。風船は当初おもちゃとして市販されているゴム風船を用いていたが割れやすく、さらに内部の空気の保持性も非常に低く、通常のインタフェースとして使用することは耐久性の観点から困難であった。そこで、筐体本体のゴム素材として、シリコンゴムとエチレンプロピレンジエンゴムをそれぞれ 50% の配合率で配合したゴムを用いることとした。これにより耐候性、耐老化性、反発弾性に優れた筐体とした。インタラクションの識別については、表面への接触を基本とするインタラクションの取得のためにマイクを、大きな形状変化を伴うインタラクションの取得のために気圧センサを風船内に内蔵し、SVM によって得られたデータを解析することで識別を行った。これらの解析には、風船の内部基板にマイコンを実装することで、PC と通信を行う操作だけではなく、スタンドアロンで動作するように実装を行った。その結果、参加者内識別においては 83.5% の識別率を得た。



(a) インタフェース筐体



(b) 筐体底部から見た基板

図 7 実装した風船型デバイス

以上により、iClay 実現に向けた要素技術を完成させた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

1. 中島康祐, 伊藤雄一, Simon Voelker, Christian Thoresen, Kjell Ivar Øvergård, Jan Borchers, "PUCs: 静電容量方式マルチタッチパネルにおけるユーザの接触を必要としないウィジェットの検出手法," インタラクシオン 2014 論文集, <http://www.interaction-ipsj.org/proceedings/2014/data/bib/14INT015.html>, 2014 (査読有).
2. J. Kono, M. Hashimoto, and T. Onoye, "Feasibility Evaluation of Near-Field Communication in Clay with 1-mm³ Antenna," Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 1121--1123, DOI: 10.1109/APMC.2013.6695041, 2013 (査読有).
3. K. Nakajima, Y. Itoh, Y. Hayashi, K. Ikeda, K. Fujita, and T. Onoye, "Emoballoon: a Balloon-Shaped Interface Recognizing Social Touch Interactions," Proc. of International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, pp. 182-197, 2013 (査読有).
4. K. Tsubaki, T. Hirose, N. Kuroki, and M. Numa, "A 32.55-kHz, 472-nW, 120ppm/C, Fully on-Chip, Variation Tolerant CMOS Relaxation Oscillator for a Real-Time Clock Application," Proc. of European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), pp. 315-318, DOI: 10.1109/ESSCIRC.2013.6649136, 2013 (査読有).
5. 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄, "Emoballoon: ソーシャルタッチインタラクシオンのための柔らかな風船型インタフェース," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 18, no. 3, pp. 255-265, <http://ci.nii.ac.jp/naid/1100096573>, September 2013 (査読有).
6. 長井崇浩, 廣瀬哲也, 椿 啓志, 黒木修隆, 沼 昌宏, "低電圧エネルギー・ハーベスティングに向けた 0.27-V 入力, 効率 75%, オンチップ・チャージポンプ回路," 回路とシステムワークショップ予稿集, pp. 319-324, 2013 (査読有).
7. T. Shinada, M. Hashimoto, and T. Onoye, "Proximity Distance Estimation Based on Capacitive Coupling between 1mm³ Sensor Nodes," Proc. of International NEWCAS Conference, DOI: 10.1109/NEWCAS.2013.6573601, 2013 (査読有).
8. I. Homjakovs, T. Hirose, Y. Osaki, M. Hashimoto, and T. Onoye, "A 0.8-V 110-nA CMOS Current Reference Circuit Using Subthreshold Operation," IEICE Electronics Express (ELEX), vol. 10, no. 4, DOI: 10.1587/elex.10.20130022, March 2013 (査読有).
9. I. Homjakovs, M. Hashimoto, T. Hirose, and T. Onoye, "Signal-Dependent Analog-To-Digital Conversion Based on MINIMAX Sampling," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E96-A, no. 2, pp. 459--468, DOI: 10.1587/transfun.E96.A.459, February 2013 (査読有).
10. K. Tsubaki, T. Hirose, Y. Osaki, S. Shiga, N. Kuroki, and M. Numa, "A 6.66-kHz, 940-nW, 56ppm/°C, Fully On-chip PVT Variation Tolerant CMOS Relaxation Oscillator," Proc. Of International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), pp. 97-100, DOI: 10.1109/ICECS.2012.6463790, 2012 (査読有).
11. K. Nakajima, Y. Itoh, Y. Hayashi, K. Ikeda, K. Fujita, and T. Onoye, "Emoballoon," Proc. of Asia Pacific Conference on Computer Human Interaction (APCHI), vol. 2, pp. 681-682, 2012 (査読有).
12. I. Homjakovs, M. Hashimoto, T. Hirose, and T. Onoye, "Signal-Dependent Analog-To-Digital Converter Based on MINIMAX Sampling," Proc. of International SoC Design Conference (ISOCC), pp. 120--123, DOI: 10.1109/ISOCC.2012.6407054, 2012 (査読有).
13. 伊藤雄一, 高嶋和毅, 小川兼人, 安徳登樹, 岸野文郎, "実物体のモーションをクエリとして用いた 3 次元形状モデル検索," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 369-379, <http://ci.nii.ac.jp/naid/1100096150>, 2012 (査読有).
14. I. Homjakovs, M. Hashimoto, T. Hirose, and T. Onoye, "Signal-Dependent Analog-To-Digital Conversion Based on MINIMAX Sampling," Proc. of International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), DOI: 10.1109/MWSCAS.2011.6026466, 2011 (査読有).

[学会発表] (計 9 件)

1. 河野仁, 鶴川翔平, 信田龍哉, 塚元瑞穂, 田中勇氣, 中島康祐, 伊藤雄一, 廣瀬哲也, 橋本昌宜, "リアルタイム 3

次元モデリングシステム iClay の実現に向けた 1mm³ 級センサノードの要素技術開発,' LSI とシステムのワークショップ, 北九州市, 2014 年 5 月 26 日.

2. 鶴川翔平, 信田龍哉, 伊藤雄二, 橋本昌宜, 尾上孝雄, ``ノード間距離情報に基づいた逐次的 3 次元ノード位置推定手法の検討,' 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 大阪市, 2014 年 3 月 7 日.
3. M. Hashimoto, ``Soft Error Immunity of Subthreshold SRAM (Invited),' International Conference on ASIC, 深セン市(中国), 2013 年 10 月 30 日.
4. 信田龍哉, 橋本昌宜, 尾上孝雄, ``センサノード間静電容量結合に基づく距離推定に向けた電極形状の検討,' 電子情報通信学会 回路とシステム研究会, 鶴岡市, 2013 年 3 月 14 日.
5. 椿啓志, 廣瀬哲也, 黒木修隆, 沼昌宏, "低参照電圧を用いた実時間計測用弛張発振回路," 電子情報通信学会 総合大会, 岐阜市, 2013 年 3 月 19-22 日.
6. 尾崎年洋, 廣瀬哲也, 椿啓志, 黒木修隆, 沼昌宏, "適応バイアス技術を用いた超低電力・高速 Rail-to-Rail オペアンプ," 電子情報通信学会 総合大会, 岐阜市, 2013 年 3 月 19-22 日.
7. 椿啓志, 廣瀬哲也, 大崎勇士, 志賀誠一郎, 黒木修隆, 沼昌宏, "コンパレータのバラツキ補正技術を用いた弛張発振回路の評価," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 富山市, 2012 年 9 月 11-14 日.
8. 増田長太郎, 廣瀬哲也, 大崎勇士, 黒木修隆, 沼昌宏, "超低電圧ダイナミックコンパレータのためのオフセット電圧補正回路の高精度化," 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 富山市, 2012 年 9 月 11-14 日.
9. 塚元瑞穂, 廣瀬哲也, 大崎勇士, 黒木修隆, 沼昌宏, 橋本昌宜, "逆流電流削減による差動型整流回路の変換効率改善," 電子情報通信学会 総合大会, 岡山市, 2012 年 3 月 22 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 昌宜 (HASHIMOTO, Masanori)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号 : 80335207

(2) 研究分担者

伊藤 雄一 (ITO, Yuichi)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号 : 40359857

(3) 研究分担者

廣瀬 哲也 (HIROSE, Tetsuya)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 70396315