

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号： 10101
 研究種目： 基盤研究（B）
 研究期間： 2009～2011
 課題番号： 21360067
 研究課題名（和文）デジタルハンドを用いた実用的な仮想エルゴノミック評価システムの開発
 研究課題名（英文）Development of a practical virtual ergonomic assessment system using Digital Hand
 研究代表者
 金井 理（SATOSHI KANA1）
 北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
 研究者番号： 90194878

研究成果の概要（和文）：本研究は、ヒトの手指の形状と運動を精密に再現した「デジタルハンド」により、デジカメ等のハンドヘルド型製品の3次元CADモデルを仮想的に把持・操作させ、「持ちやすさ」や「操作のしやすさ」を迅速に評価できる「仮想エルゴノミック評価システム」の開発が目的である。このため、(1)MRI計測に基づく高精度なデジタルハンド構築、(2)最適化に基づく把持姿勢自動生成、(3)手指筋骨格モデルを用いた「持ちやすさ」の定量推定、(4)逆運動学に基づいた「操作のしやすさ」の定量推定、(5)手指・製品間の高速度な接触変形シミュレーションといった機能を開発した。またこれらを、企業での製品形状評価に試用した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of the research is to build a “virtual ergonomic assessment system” for handheld products such as digital cameras based on the “Digital Hand”. The Digital Hand is a model which can simulate the 3D precise outer skin geometry and finger kinematic structure of human hands. Ease-of-grasp and ease-of fingered operation can be quantitatively evaluated in the system. The following functions were developed; (1) Constructing Digital Hand models based on MRI measurement of human hands, (2) Optimization-based grasp posture synthesis, (3) Quantitative estimation of ease-of-grasp based on muscle-skeletal model, (4) Quantitative estimation of ease-of fingered operation, and (5) Efficient contact deformation simulation between hand and product. Moreover, the developed software was applied to evaluating the product shape in real design environments of manufactures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野： CAD, 形状モデリング, 設計工学, 機械工学・生産工学

科研費の分科・細目： 機械工学, 設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード： デジタルヒューマンモデリング, 人間工学, デジタルエンジニアリング

1. 研究開始当初の背景

手で把持し操作するハンドヘルド型製品は多岐にわたり、市場規模も大きい。デジカメ、バーコードリーダーといった情報機器から、電動工具、容器、自動車などの操作部品が典

型例である。これら製品の市場競争力を今後どのように維持してゆくかは、各メーカーでも大きな課題となっている。

現在、設計現場での製品の「持ちやすさ」や「操作しやすさ」の評価（以後「エルゴノ

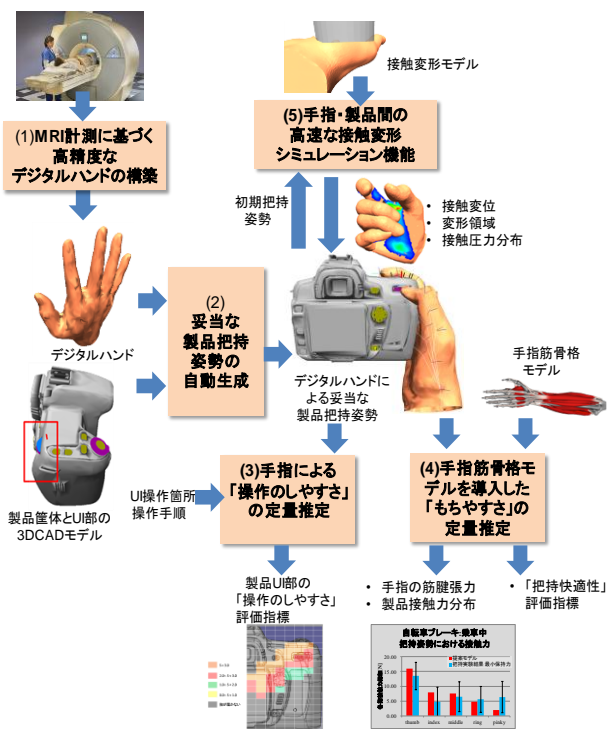


図1 研究の概要

ミック評価」と呼ぶ)は、物理モックアップを実験者に利用させてテストする方法が、一般的である。しかしこの方法は、モックアップの製作に多大な時間やコストを要すること、また広範囲な年齢・性別・国籍・身体特徴をもつ多数の被験者を参加させたテストの実施が難しく、さらに「持ちやすさ」や「操作しやすさ」が定性的な主観評価値でしか得られず、合理性に欠けるといった問題をもつ。このため現実には開発期間やコスト上の制約から、十分な評価を行わないままに「持ちづらく」「操作しづらい」製品を量産しているケースも少なくない。

一方で、製品形状の3次元CADモデルを設計初期から作成するプロセスが、多くの企業においてごく一般的となっている。

従って、物理的な試作品と実験者によるテストに頼らずとも、製品のCADモデルを活用し、短期間かつ低コストにハンドヘルド型製品のエルゴノミック評価を合理的かつ定量的に行える手法の確立が、これら製品の設計部門において強く望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、人間の手指形状と運動を精密に模擬する3次元デジタルハンドモデルで、製品の3次元CADモデルを仮想的に把持・操作させ、製品の「持ちやすさ」及び「操作のしやすさ」をデジタルデータのみから迅速かつ容易に評価できる「仮想エルゴノミック評価システム」の開発を目的とする。またその評価値が、実製品設計に十分な信頼性・合理性

性を有することを実験的に検証する。

3. 研究の方法

この目的達成のため、本研究では図1の通り、(1)~(5)に示す各機能の開発を行った。またこの機能の1部を実装した企業向けソフトウェアを自転車部品メーカーの設計部門に実際に導入し、実用性を評価した。

- (1) ヒトの手指のMRI計測に基づく高精度なデジタルハンドの構築機能
- (2) 類似検索と最適化に基づく妥当な把持姿勢の自動生成機能
- (3) 逆運動学に基づく、手指による製品の「操作のしやすさ」の定量推定機能
- (4) 手指筋骨格モデルを導入した筋腱負荷分布の推定に基づいた「持ちやすさ」の定量推定機能
- (5) 手指・製品間の高速な接触変形シミュレーション機能

4. 研究成果

(1) ヒトの手指のMRI計測に基づく高精度なデジタルハンドの構築機能

デジタルハンドを用いた実用的な仮想エルゴノミック評価を実現するには、まず人間の手による把持姿勢が計算機内に高精度に再現できなければならない。そこで、把持状態の手のMRI計測を行い、この計測データに基づきデジタルハンドを構築した。

まずMRIにより図2(a), (b)の計7把持姿勢を、表1の条件で計測した。なお拇指の運動に伴う表皮変形を計測する為、(a)のように、拇指球付近表皮上にマーカを配置した。

得られたMRI計測データから、画像処理ソフトにより骨と表皮の境界面メッシュモデルを抽出した。さらに、骨と表皮以外の部分を除去した後、平滑化と細分割曲面化を行い、滑らかな表面形状に改善されたメッシュモデルを生成した。図3に得られた手の骨メッシュ、表皮メッシュの例を示す。

次に、手指の骨リンク構造の関節回転軸の位置・姿勢をIterative Closest Point法により同定した。また拇指CMC関節の運動は、併進と回転の合成運動となるため四元数を用いた球面線形補間と並行移動の合成で表

表1 MRI計測条件

年齢	23歳
性別	男
手の運動障害	なし
撮画像像	T1強調画像
磁場強度	1.5T
解像度	256×256
スライス厚さ	1.0mm
撮像時間	約4分
マーカ	口中清涼カプセル
固定具材質	紙粘土



(a) 拇指 CMC 運動限界姿勢 (b) 4 指関節 運動限界姿勢

図2 MRI計測手姿勢

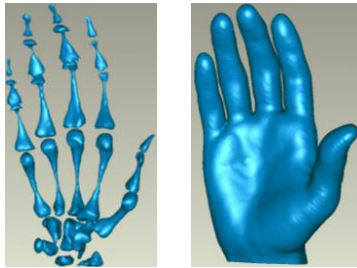


図3 MRI計測から得られた骨メッシュモデル(左)と、表皮メッシュモデル(右)

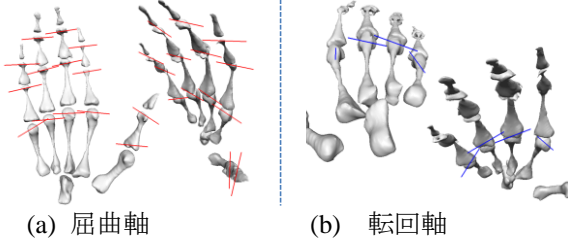


図4 4指および拇指MP・IP関節の回転軸

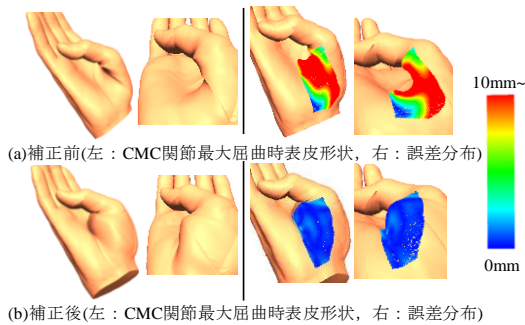


図5 拇指CMC関節の運動に伴う表皮変形

現した。その結果、図4のような関節回転軸が求められた。この回転軸を用いて再現したデジタルハンドの手指の運動は、手指回転運動の誤差が、骨表面で1mm以内と高精度なモデルであることが分かった。

一方、親指根元部の表皮変形は、製品把持時の表皮に数点のマークをつけて把持前後でMRI測定し、少数マーク点における表皮変形前後の変位ベクトルを、表皮形状全体にRBF補間を用いて分布させた。このモデルを用いた拇指CMC関節最大屈曲時の表皮変形結果を図5に示す。従来の表皮変形では、(a)のように、拇指球付近の表皮ふくらみが不十分であるのに対し、提案手法による変位補正後は、(b)のように実際の表皮形状に類似したふくらみが表現できている。また拇指球付近の表皮メッシュ頂点と、運動後表皮メッシュの最近頂点との距離誤差は、補正前で最大19.5mm 平均11.3mmであったのに対し、補正後、最大3.9mm 平均0.8mmに改善された。

(2) 類似検索と最適化に基づく妥当な把持姿勢の自動生成機能

次に、製品筐体のCADモデルに対し、妥当な把持姿勢を自動推定する機能を開発し



図6 自転車ハンドル類似把持姿勢の初期候補群

第1位	第2位	第3位	第4位	第5位
218.9	199.8	191.2	188.2	185.2
第6位	第7位	第8位	第9位	最下位
180.0	174.3	172.7	171.3	20.6

図7 フィット性最適化に基づいたカメラ筐体の最適把持姿勢(上位10位)

た。推定手法として、①把持例題との類似性を利用した姿勢生成法、および②最適化を用いた姿勢生成法、の2つの機能を開発した。

把持例題との類似性を利用した生成法では、製品把持時の手指の姿勢を接触式3次元デジタイザで計測し、データベースに登録する機能と、把持させたい新たな製品の3次元CADモデルを問い合わせにし、データベース内の製品群との間で形状の類似検索を行い、類似把持姿勢の初期候補を求める機能を開発した。さらに多数の初期候補中から、頭部姿勢や上肢骨格の制約を考え、製品使用上、妥当と思われる少数の姿勢のみを自動選択する機能を開発し、携帯電話、デジタルカメラ、自転車ハンドル等の例で、妥当な把持状態を生成可能なことを検証した。図6に推定された初期把持姿勢候補の例を示す。

一方、最適化を用いた姿勢生成法では、筐体と手の「フィット性」を最大化する姿勢生成法を開発した。目的関数は、ハンド・筐体間の接触面積、筐体凸稜線部への指腹部分の重複の程度、手指関節角の連動性制約への適合度の和として定義し、これを最大化する姿勢を全探索する。一眼レフカメラを対象に、最適把持姿勢を推定した例を図7に示す。同時に、この推定最適把持姿勢を実験者に再現させ、フィット性の主観評価値も得た。その結果、最適把持姿勢の方が人間にとっても、よりフィット感の高い妥当な姿勢であることを実験的に検証できた。

(3) 逆運動学に基づく、手指による製品の

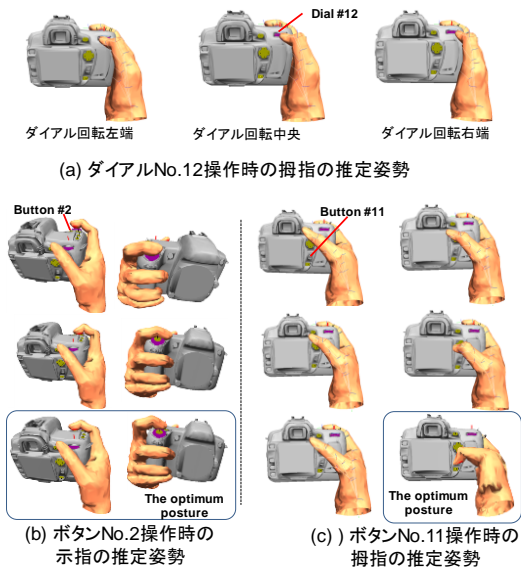


図 8 デジタルハンドによる UI 操作部の操作指姿勢生成例

「操作のしやすさ」の定量推定機能

携帯電話やデジタルカメラ等のハンドヘルド型製品の設計においては、筐体の「持ちやすさ」のみならず、指によるボタンやダイヤル等のユーザインタフェース(UI)操作部の「操作のしやすさ」も重要となる。そこで、デジタルハンドにより製品を把持した状態において、UI 操作部に対する指の操作姿勢の自動生成と、指による操作容易性を定量評価する機能を開発した。

まず、デジタルハンドと製品モデルを入力し、前述(2)の機能を用いて最適な把持姿勢を1つ生成する。次に、製品モデル上でのボタン・ダイヤル等の UI 操作部に対応した面領域の属性付け、および指による UI 操作手順の定義を行う。これらの入力データに基づき、システムが最適把持姿勢の指姿勢から、逆運動学を用いて UI 操作部を操作する指姿勢を、システムが自動生成する。図 8 に、システムが自動生成したデジタル1眼レフカメラ筐体上のボタン、キー、ダイヤル部を操作する際の指姿勢の推定結果を示す。

最後に、その操作指の姿勢から「指先の到達可能性」、到達できる場合には「関節可動限界に対する余裕度」を評価し、これらを合成した 0~3 の範囲の操作容易性評価値をシステムが導出する。

この指標値と、実験による主観的な「操作のしやすさ」との相関を調査した。22~25歳の日本人男性8人に市販のデジタル1眼レフカメラ筐体を把持させ、それぞれ UI 操作部に対する操作のしやすさの主観値(0:操作不可能~3:最も操作が容易)を調べ、本システムが推定した、操作容易性評価値と比較した。その結果、両者には $R=0.9$ 程度の高い相関があることを確認した。

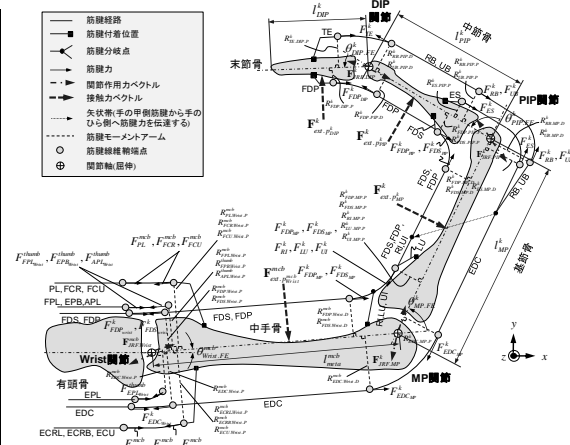


図 9 筋骨格モデル (拇指以外の4指)

(4) 手指の筋骨格モデルを導入した筋腱負荷分布の推定に基づいた「持ちやすさ」の定量推定機能の開発

物体を把持する際の「持ちやすさ」は、把持時に手指内部で主要活動している筋腱力や関節作用力の分布状態、製品に対する手指の接触力と高い相関を持つことが、過去の実験的研究から示されている。そこで本研究では、手指の主要筋腱ネットワークと手の骨の関節構造からなる手指筋骨格モデルをデジタルハンドに実装し、把持時の主要筋腱の作用力と、手指接触力から「把持快適性」を定量推定できる機能を、以下の手順①~④に従って開発した。

- ① 筋骨格モデルの構築: MRI 計測から得られたデジタルハンドに対し、筋腱附着位置や筋腱長等を数値として定義した筋骨格モデル(図 9)、生理学的知見に基づく筋腱力発揮と筋腱ネットワーク分岐点での腱張力つり合いを、等式および不等式制約として表現した。本モデルでは、片手あたり合計 29 本の筋腱に作用する力をモデル化した。
- ② 接触力の仮定: 既に推定されている把持姿勢における製品とハンドとの接触点に関し、ハンドの手指領域毎に代表接触点を選択し、その点で手指接触力が集中的に発揮されると仮定した。
- ③ 手指の接触力、内部負荷分布の導出: 筋骨格モデルと代表接触点等の把持姿勢の情報、そして把持製品に要するタスクを考慮した手指接触力と内部負荷分布(筋腱力、関節作用力)を、筋腱応力の二乗総和を最小化する制約付 2 次計画問題の最適解として導出した。
- ④ 「把持快適性」評価指標の算出: 過去の把持実験における主観的快適性と接触力・筋電図積分量の関係に関する知見に基づき、③で導出された手指の接触力、筋腱力を用い、各指の(筋腱力総和/接触力総和)の比をデジタルハンドから定量

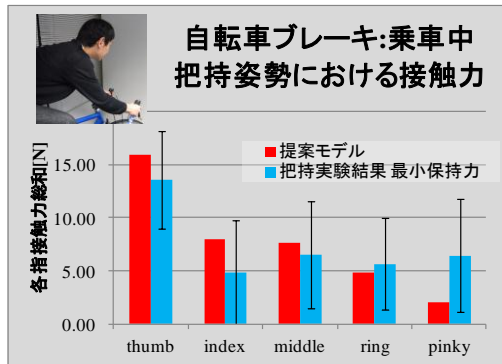


図 10 ブレーキレバー把持時の各指接触力[N] 測定値と本モデルによる推定値

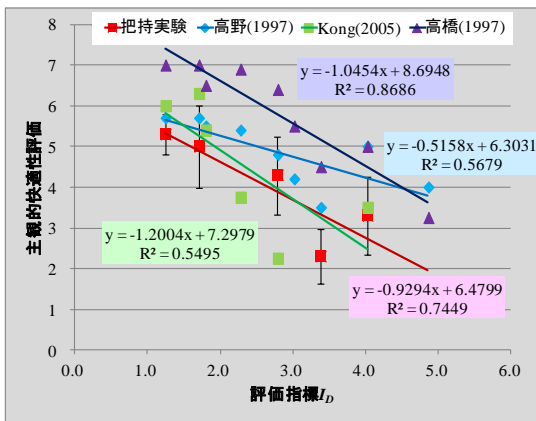


図 11 円筒把持時の主観的快適性評価と 快適性評価指標値との相関

推定する「把持快適性」指標とした。

まず円筒把持実験を行い、提案モデルの接触力推定の妥当性を検証した。その結果、水平・垂直いずれも、最小保持力の測定値との誤差平均が 3.86N 程度であった。また、自転車ブレーキレバーの最小保持力についてもモデルと実験値を比較した。その結果、図 10 のように誤差平均が 2.35N であり、近似精度が妥当であることが分かった。この結果から、提案モデルによる筋腱力、接触力推定精度が妥当なことが確認出来た。

さらに、このモデルから推定される筋腱力総和と接触力総和の比で表される「快適性評価指標」の数値と、把持実験から得られた主観的快適性評価値との相関を比較した。提案指標が直径 35~40mm 円筒付近で最小値を取り、実験における快適性評価の高い直径円筒と反比例の関係を示した。また図 11 に示すように、主観的快適性と本評価指標との間には強い負の相関($R=0.86$)がみられ、提案指標の妥当性が確認出来た。

これらの結果より、提案する手指の筋骨格モデルとデジタルハンドを利用し、製品把持時の手指の接触力分布、ならびに「把持快適性」の定量推定が可能であることが分かった。

(5) Quasi Rigid モデルと Boussinesq 近似を活用した手指・製品間の高速な接触変形シミュレーション機能

デジタルハンドによる「持ちやすさ」評価では、手指表面と製品表面との接触領域、接触力を、評価に十分な精度で、かつ高速に推定できる必要がある。そこで本研究では、この接触変形シミュレーション機能を新たに開発し、これをデジタルハンドへ実装した。

この接触変形シミュレーションモデルでは、手指の接触変形が局所限定される Quasi-rigid モデル近似、カー変位関係を線形化する Boussinesq 近似、さらに人体組織のもつ体積保存性制約を組み合わせ、比較的高速に接触変形を推定可能とした。

提案モデルを用い、接触力、変形量、接触面積を、画像処理を用いた実験からの計測値と比較した結果の一部を図 12 に示す。その結果、提案モデルを用いて接触力、変形量、接触面積の 3 者の関係を、高い精度で近似可能なことを実証した。またシミュレーション時間も手指 1 領域の接触で 1sec 以下、掌で

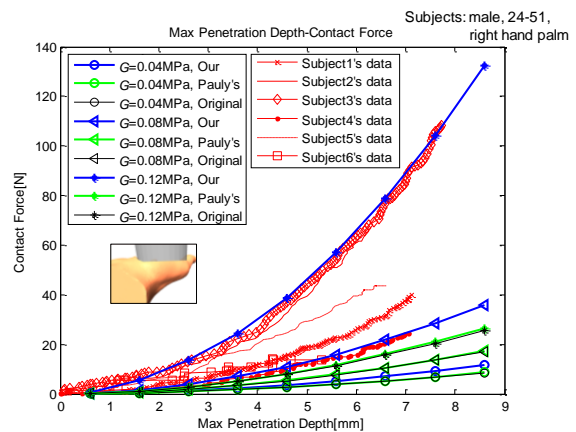


図 12 接触変形モデルを用いたデジタルハンド掌部の接触変形変位—接触力の推定結果と実験結果(赤)比較

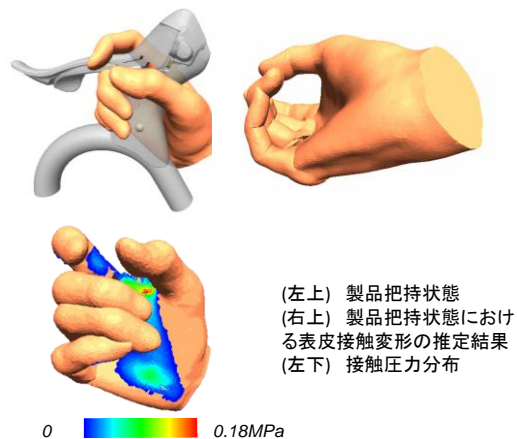


図 13 提案モデルを用いた製品把持時の皮膚変形と圧力分布シミュレーション例

も 30sec 以下と、製品設計時の仮想エルゴノミック評価に用いるには、十分に高速であることが判った。さらに図 13 のように、この接触変形モデルをデジタルハンド内に実装し、任意の製品把持時の接触領域と接触圧力分布を推定可能とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

- ① Satoshi Kanai and Seiya Suzuki: "Estimating ease of single-fingered operations of hand-held appliances with digital hand", Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, (CD-ROM) DETC2011-48838, (2011) [査読あり]
- ② Yasutomo Shimizu, Hiroaki Date and Satoshi Kanai: "Constructing a Finger Biomechanical Model for Virtual Ergonomic Assessment in Digital Hand", Proceedings of 2011 Asian Conference on Design and Digital Engineering 2011, Vol.1, pp.543-547, (2011) [査読あり].
- ③ Yoshiyuki Shiroma (1 番目), 他 3 名: "A prototype manufacturing process for a health care IT appliance", International Journal on Interactive Design and Manufacturing, Vol.3, No.3, pp.135-146 (2009) [査読あり]
DOI: 10.1007/s12008-009-0071-y.
- ④ Yui Endo(1 番目), Satoshi Kanai (2 番目), Masaaki Mochimaru(5 番目), 他 3 名: "Optimization-Based Grasp Posture Generation Method of Digital Hand for Virtual Ergonomic Assessment", SAE International Journal of Passenger Cars -Electronic and Electrical Systems, Vol.1 No.1, pp.590-598 (2009) [査読あり]
DOI: 10.4271/2008-01-1902.
- ⑤ 遠藤維, 金井理, 岸浪建史, 宮田なつき, 河内まき子, 持丸正明: 「デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合によるエルゴノミック評価システムの開発(第 2 報) —把持容易性評価機能および把持姿勢の最適化手法—」, 精密工学会誌, Vol.75 No.4, pp.548-553 (2009)[査読あり]
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110006613732>.
- ⑥ Keisuke Kawaguchi, Yui Endo and Satoshi Kanai: "Database-Driven Grasp Synthesis and Ergonomic Assessment for Handheld Product Design", Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5620/2009, pp.642-652, Springer (2009) [査読あり]
DOI: 10.1007/978-3-642-02809-0_68

〔学会発表〕(計 21 件)

- ① Satoshi Kanai: "3D human hand modeling and its application to virtual ergonomic assessments", [招待講演] CAD 2011 Conference and Exhibition, June 30th, 2011, Taipei, ROC.
- ② Yulai Xie, Hiroaki Date, Satoshi Kanai: "An efficient skin deformation based on modified Boussinesq approximation for Digital Hand", 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演会, 2012 年 3 月 14 日, 首都大学東京, 東京都.
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/pscjspe/-char/ja/>
- ③ 清水康友, 金井理, 伊達宏昭, 白土博樹, 神島保: 「筋骨格モデルを備えたデジタルハンドによる物体把持力の推定」, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演会, 2012 年 3 月 15 日, 首都大学東京, 東京都.
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/pscjspe/-char/ja/>

〔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〕

ホームページ等

<http://www.sdm.ssi.ist.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金井 理 (KANAI SATOSHI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 90194878

(2) 研究分担者

城間 祥之 (SHIROMA YOSHIYUKI)

札幌市立大学・デザイン学部・教授
研究者番号: 90113571

(3) 連携研究者

伊達 宏昭 (DATE HIROAKI)

北海道大学・大学院情報科学研究科・
准教授

研究者番号: 20374605

持丸 正明 (MOCHIMARU MASAOKI)

独) 産業技術総合研究所・デジタル
ヒューマン工学研究センター・センター長
研究者番号: 90358169