

解説 2. デジタルはアナログ世界を制御するか

介護支援ロボット RIBA は アナログな人間をどう扱うか

How dose the Nursing-Care Assistant Robot RIBA Deal
with Analogue Humans?

執筆者プロフィール



向井 利春
Toshiharu MUKAI

◎1995年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 博士(工学), 2007年9月より現職
◎研究・専門テーマは, センサ情報処理, 人間共存ロボット
◎正員, (独) 理化学研究所 理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター ロボット感覚情報研究チーム チームリーダー
(〒463-0003 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271-13 理化学研究所 RTC/
E-mail: tosh@nagoya.riken.jp)



細江 繁幸
Shigeyuki HOSOE

◎1967年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了, 工学博士, 2007年9月より現職
◎研究・専門テーマは, 制御工学, 人間共存ロボット
◎正員, (独) 理化学研究所 理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター 連携センター長
(〒463-0003 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271-13 理化学研究所 RTC/
E-mail: hosoe@nagoya.riken.jp)

1. はじめに

われわれの所属する理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センターでは, 人と接して力仕事を行うロボットを研究している。用途は介護を念頭に置いており, とくに, ベッド-車椅子間などの乗り移りである移乗を支援するロボットを第一の目標としている。われわれが製作した介護支援ロボット RIBA⁽¹⁾を図1に示す。RIBAは実際に人を対象にベッド-車椅子間の移乗作業を実現した(図2)。

介護支援ロボットは人と接触し, 人との力の相互作用を通して仕事を行う点で, 各種産業用ロボットや生活支援ロボットなど他の多くのロボットとは異なった特徴を有す

る。人および人の周囲の物理環境は極めてアナログな世界であり, デジタルとは最も距離があるように見える。しかし, このような対象であっても, デジタルの技術は介護支援ロボットに欠かすことのできない必須の技術である。

介護支援ロボット RIBA におけるアナログとデジタルのかかわりあいには, ①デジタル制御としての側面, ②介護者との協調作業のための情報伝達, ③面状触覚センサにおける圧力情報の空間的離散化の三つの異なった様相に区分される。①はロボット全般に共通の必須技術であるが, 介護支援ロボットにおいてはとくに, 安全で痛みのない抱き上げを行うための柔軟外装による多点面接触の制御など, 従来にない新しい制御アルゴリズム⁽²⁾⁽³⁾とアーキテクチャの開発が必要である。②について, 介護支援ロボットは, ロボットのために作られたのではない介護施設や病院のような一般的な環境で用いられ, しかも被介護者の身体的特徴や位置・姿勢のみならず体調や気分までもが変化しうる状況にも対処できなければならない。すなわち, 介護支援ロボットの対象は複雑でアナログ的であり, もっとも規格化(デジタル化)が困難な対象である。これに対処する方法としてわれわれは介護者による触覚ガイダンス⁽⁴⁾の考えを導入し, 複雑な環境の認識や判断は介護者の役割とした。このために, 介護者, ロボット, 被介護者間の簡潔でわかりやすい情報伝達の方法を確立する必要がある。開発中の

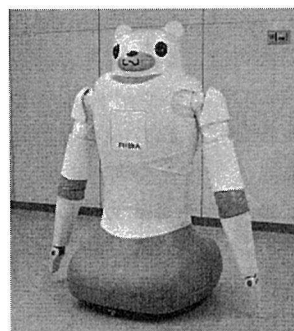


図1 介護支援ロボット RIBA

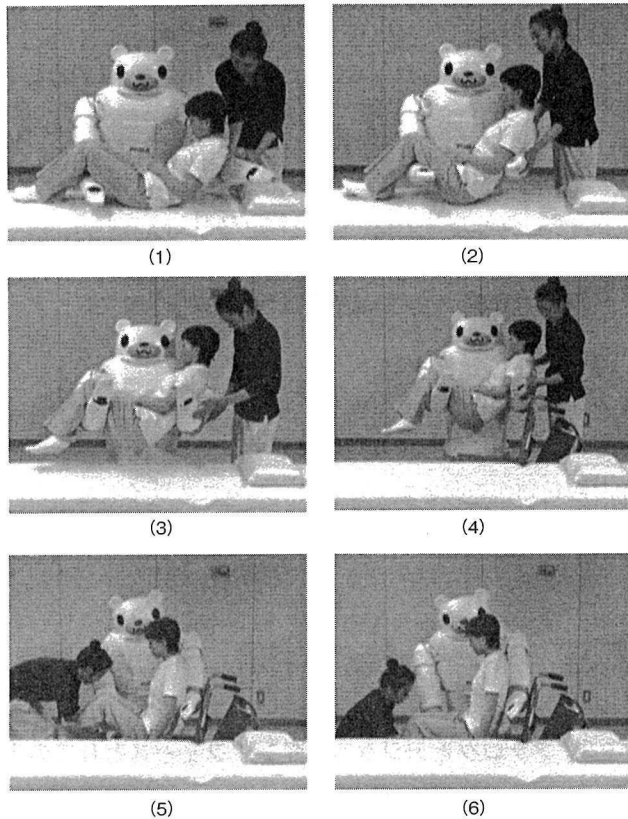


図2 RIBAによるベッドから車椅子への移乗作業

表1 RIBAの主な仕様

大きさ	幅 奥行 高さ	750mm (腕を折りたたんだ時) 840mm 1400mm
重量 (バッテリー含む)		180kg
自由度	頭 腕 腰 台車	3 (現在は1自由度のみ使用) 片腕7 2 3 (駆動輪数は4)
台車の動き		オムニホイールによる全方向移動
アクチュエータ		DC モーター
可搬重量		63kg (実験により確認した値)
稼働時間		標準的な使用で2時間
動力源		ニッケル水素バッテリー
センサ	視覚 聴覚 触覚	カメラ2台 マイクロホン2本 上腕 (片腕 128 感圧点) 前腕 (片腕 94 感圧点) ハンド (片腕 4 感圧点) 肩パッド (片側 8 感圧点)

ロボットでは、介護者からロボットへ指令を与える手段として、音声および触覚を用いているが、このうち特徴的であるのは後者による方法である。すなわち、触覚情報は力学情報の取得のためのみならず、制御指令の伝達のためにも利用される。触覚情報の取得には面状触覚センサを用いる。ここで③が必要となる。われわれが開発した半導体圧力センサアレイによるものも含め、一般に、触覚センサでは圧力分布に関する情報が空間的に離散化され計測される。このような離散化された情報から、接触力や圧力中心位置などの連続情報を求める問題についても検討する必要

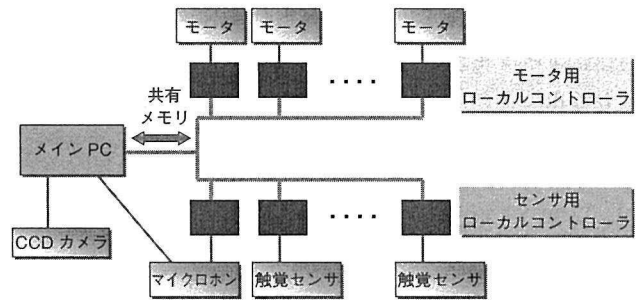
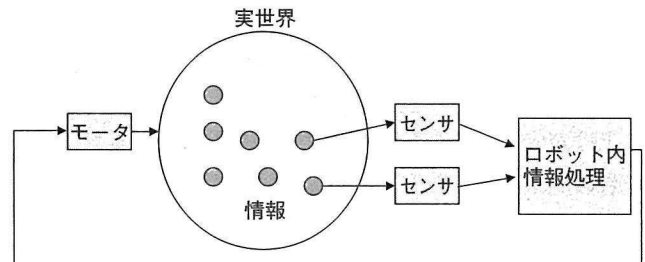
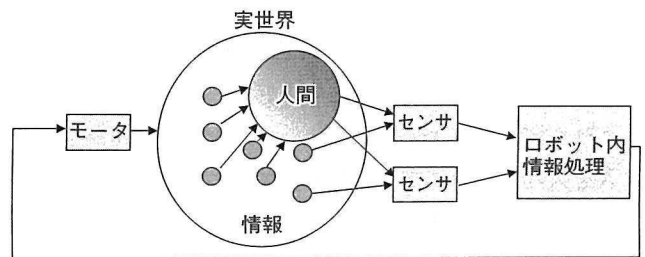


図3 RIBA内の分散情報処理系



(a) 情報の多くがセンサで取得されずに残る



(b) 人の優れた感覚で情報を取得しロボットに伝える

図4 人を処理ループに入れることによる取得情報の増加

がある。

本稿では、人とロボットの接触動作に関連する②と③の課題を軸にして、ロボット RIBA がアナログ世界で活動するために、どのようにデジタルデータを取得し、処理しているかを解説する。

2. RIBAの情報処理

2.1 RIBA全体の仕様

RIBAの主な仕様を表1に示す。RIBAは人と接して力仕事を行うので、力覚系のセンサがとくに重要となる。介護動作時に腕に加わる力の大きさと位置を知るため、RIBAは腕の広範囲に触覚センサを装備している。情報処理系の構造を図3に示す。センサデータやモータのフィードバック制御は、処理対象の近傍に設置した小型のローカルコントローラにて行われる。つまり、ローカルコントローラが現実世界とロボット、言い換えればアナログとデジタルのインタフェースとなっている。ローカルコントローラと処理の中心となるメインPCとは、仮想的な共有メモリ機能を持つロボット内ネットワークで接続されており、分

散情報処理系を構成している。仮想共有メモリはデジタル通信によって実現されており、デジタルの特性を生かした誤り検出訂正によりノイズ環境下でも高い信頼性が得られるが、サイズは1024byte(共有メモリサイズ512byteのネットワークを2つ使用)と限られている。各ノード間の同期は2.4ms以内に行われることが保証されている。

2.2 情報処理ループ

複雑な現実世界で人を相手に間違いの許されない動作を行うには、多くの状況判断が必要である。たとえば、移乗介助を行うには、乱雑な環境中で移動し、被介護者がベッドに寝ていて、場合によっては毛布などが掛かっている状態から、どの部分にロボットの腕を持っていけば良好な抱き上げができるかを判断しなければならない。また、被介護者の声や表情から、抱き上げられるための心の準備ができていないかなどを判断する必要がある。現在のRIBAは感覚機能として視覚、聴覚、触覚を持つが、これらを用いても複雑な判断をロボットが間違いなく行うのは、現在や近い未来の技術では困難であるというのがわれわれの考えである。

これを解決するために、RIBAでは情報処理ループの中に人を入れるという方法を採用している。この考え方を概念的に表したものが図4である。図4(a)のように人がループに入っていない場合には、ロボットセンサの情報取得能力が限られているために、介護動作に必要な情報の一部しか取得できず、取りこぼしている情報が多くある。これに対し、人は優れた感覚と高い認識能力を持つので、感覚を通してはるかに多くの情報を環境から取得できる。そこで、ループ内で人を通してこの情報を取得し、その結果をロボットに伝えることにした。図2ではこの機能を使って移乗を行っている。操作者が被介護者のすぐそばで、ロボットの動作による状況の変化を時々刻々感じながらロボットに指令を送ることにより、多様な状況に対応した移乗が実現できている。

人の判断は、離散的でデジタル的な動作の選択と、連続でアナログ的な動作内の軌道調節に分けられる。これらはセンサを通してロボットに伝えられる。動作の種類の結果は、離散的な概念を伝えるのに適した音声コマンドでロボットに伝えられる。具体的には、「ベッドからの抱き上げ」、「車椅子に下ろす」などの音声コマンドが使われる。軌道調節はアナログ的な量なので、音声コマンドで伝えるのは難しい。そこで、軌道を変えたい方向や程度に合わせてロボット表面の接触位置を押したりスライドしたりするなどの力学的な量を用いることにした⁽¹⁾。人が他の人に動作を伝えるときに、「手取り足取り」で伝えるのと同様の考え方である。具体例として台車移動を考えると、前進して欲しい時には上腕に操作者の手を添えて前にスライドさ

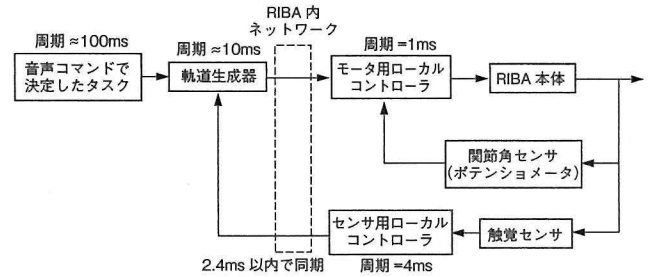


図5 RIBAの処理の流れのブロック図

せる、横に並進移動して欲しい時には上腕の側面に手を当てて移動方向に押ししたり引いたりするなど、所望の移動方向と触覚動作の向きを一致させ、さらにスライド量や力の大きさを移動速度を指定することで直感的な操作を可能とした。これらの力学的な量は、RIBAでは触覚センサにより取得される。つまり、RIBAの触覚センサには、人が判断したアナログ的な量を伝えられるだけの能力が求められる。

2.3 アナログとデジタルのインタフェースとしての小型ローカルコントローラ

ロボットRIBAでは、実環境におけるアナログ量と情報処理系におけるデジタル量の変換は、内部に設置された多数のセンサとモータが担っている。また、これらの変換と制御のためにセンサやモータの近傍にローカルコントローラが設置され、全体として階層的な分散処理構造になっている。これは以下の理由による。まず第1に、ノイズ環境下でのアナログ信号伝達の問題がある。触覚センサはロボット表面の広範囲に分布するので、メインPCでA/D変換を行おうとすると、触覚センサからのアナログ信号を伝達するケーブルをロボット内で多数、長距離引き回すことになる。ロボット内はモータなどのノイズ源が多数あるうえに、空間が限られており、さらに、関節が動くことによりケーブルも頻繁に変形するので、ノイズの影響を受けやすい。これは望ましくないため、触覚センサ近傍のローカルコントローラで信号をデジタル化し、情報集約されエラー訂正も行えるデジタル情報をネットワークで伝達する方法が有効となる。RIBAでは、触覚センサからセンサコントローラまでは10cm程度と可能な限り短くしている。第2に時間管理の問題が挙げられる。モータを安定して動作させるためには一定の周期でフィードバックを行う必要があるし、センサ信号も時間方向の処理を行うためには一定周期でサンプリングを行う必要がある。しかし、認識などの複雑な処理を担当するメインPCは、リアルタイム処理を行うのには相応しくない。そこで、現実世界とのインタフェースで時間管理が必要な部分はローカルコントローラに任せてしまう方法が有効となる。第3にI/Oの数が挙げられる。たとえばセンサで考えれば、数が増えるのに合

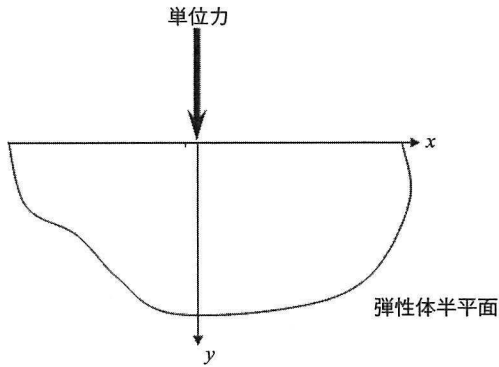


図6 弾性体半平面上の単位点荷重

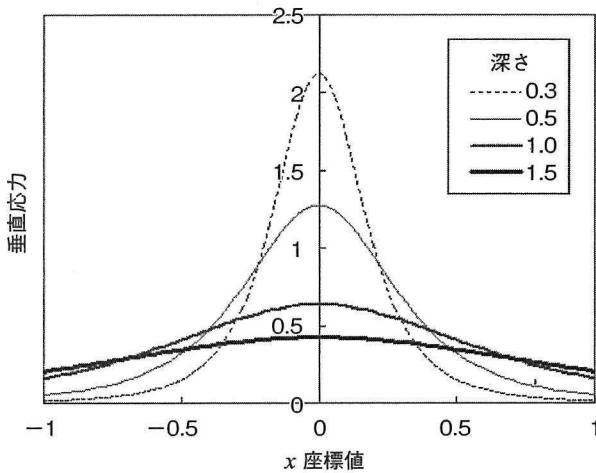


図7 深さによる垂直応力の変化

わせて A/D コンバータが多数必要になるが、通常の PC にそれだけの A/D コンバータを直接繋ぐのは困難である。第4の理由が分散処理によるメイン PC の情報処理量負荷の低減である。

ローカルコントローラはわれわれが開発した小型情報処理ボードを用いて実現されている。この小型情報処理ボードには、時間方向での離散化による情報の劣化を極力起こさないように、十分な高速性とリアルタイム処理を行える時間管理能力が求められる。ロボットの制御では、経験的に対象の共振周波数の10倍以上高速なフィードバック周期が求められる⁽⁴⁾。現在のモータコントローラは1ms周期で制御を行っているが、RIBAの共振周波数は数Hzなので、十分な速度である。触覚センサコントローラの処理周期は、サンプリングのみなら1ms以下、パターン処理を行った場合、現在は4ms必要としている。標本化定理を考えれば、125Hz以下の信号を再現できることになる。これは接触対象が人の場合には十分な速度である。このように、RIBAでは時間方向に関しては十分高速なローカルコントローラを使うことで、変換による情報の劣化の問題を無視できるものとしている。

RIBAの制御の流れを図5に示す。アナログの現実世界

に近いところほど時間管理能力に優れた処理装置を使い、短い周期で処理を行っている。より抽象化され時間が重視されない上位の処理は、ネットワークの先にあるメイン PC で行われる構成となっている。

3. 空間的に離散的な触覚センサによる連続情報の取得

RIBAの触覚センサとしては、以前われわれが開発した触覚センサ⁽⁶⁾をベースにRIBAに合わせて素子間隔などを変えたものを使っている。感圧素子としてピエゾ抵抗型半導体圧力センサを用いており、21.5mm間隔で2次元アレイ状に配置された半導体圧力センサを弾性体中に埋め込んでいる。触覚センサはロボット外装表面に加わる圧力の面分布を取得する。これに対応する現実世界の物理量は空間的、時間的に連続的に広がっている。RIBAの触覚センサは前述の通り時間的には十分な速さでサンプリングできるが、空間的には21.5mm間隔と粗い解像度となっている。そこで、空間的に離散配置された感圧素子を用いて、どのように連続的に変化する量を捉えるかを説明する。

センサ表面、つまり弾性体表面に加わった力は、感圧素子に達するまでに弾性体中を広がりながら伝わっていく。これは、一種の空間的ローパスフィルタのような性質を持つ。簡単のため、図6に示す二次元的な状況で、半平面で表される弾性体表面に大きさ1の点荷重が印加されている場合を考える。三次元では、均一な弾性体が紙面と垂直方向も含めて無限に広がっており、紙面に垂直な単位長さ当たり1の線荷重が加わっている場合に相当する。この状況では、位置 (x, y) における y 方向の垂直応力は

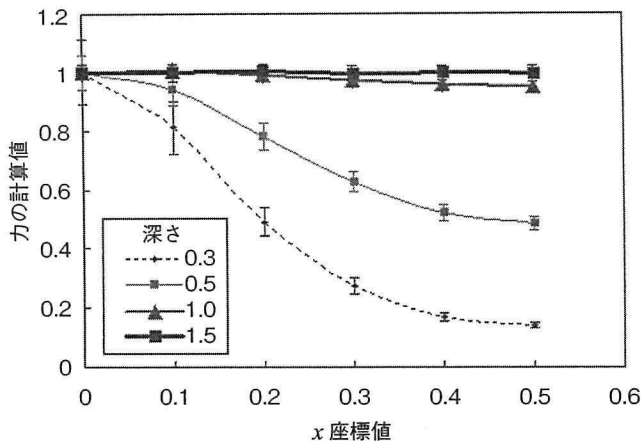
$$\sigma_y(x, y) = \frac{-2}{\pi} \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2} \tag{1}$$

と表される⁽⁶⁾。深さ y を変化させたときの $\sigma_y(x, y)$ をプロットしたものを図7に示す。深くなるほど応力が広がっていく様子が見て取れる。荷重が分布を持つ場合には、式(1)をインパルス応答と見てたたみ込みを計算すれば、任意位置の y 方向垂直応力が計算できる。

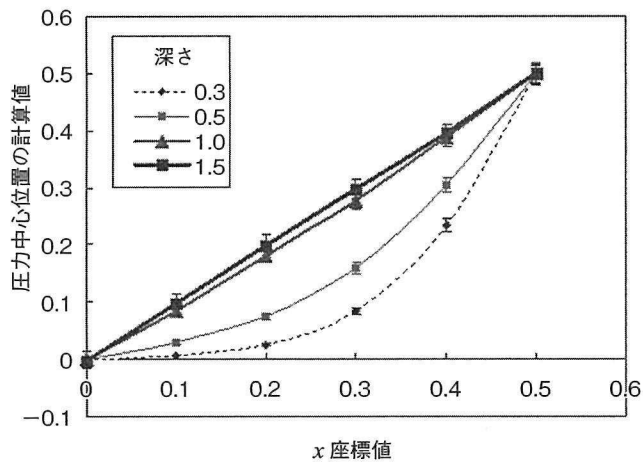
RIBAでは、触覚からの情報として、主に接触領域の力と圧力中心位置を用いている。そこで、弾性体中に離散的に配置された i 番目の感圧素子で計測した垂直応力の値 p_i から接触領域の力と圧力中心を計算する式

$$S = \sum_i p_i, \quad x_{\text{cop}} = \frac{\sum_i x_i p_i}{S} \tag{2}$$

の値が、弾性体表面上の実際の値に近くなればよい。ただし、 x_i で i 番目の感圧素子の x 座標値を表した。 x 方向に間隔1で配置された感圧素子の深さを変えた時の、表面上の単位点荷重位置に対応する力の大きさと圧力中心位置の計算結果を図8に示す。ただし、感圧素子出力には標準偏



(a) 力の計算値



(b) 圧力中心位置の計算値

図8 力の位置を変えたときのセンサ出力からの計算値の感圧素子深さによる変化

差が出力の5%のガウスノイズが加わるとした。また、力を得るための圧力総和は点荷重が直上にある時の値で正規化した。感圧素子が弾性体表面近くにある場合には誤差が大きいが、深くなるにつれて弾性体の力学特性による効果が現れて、総和や圧力中心が連続的に変化する量として計測可能になっていることがわかる。

以上の結果は、圧力の空間的に離散化された測定値によっても、センサの弾性体厚みを適切に設定することによって、連続変数である荷重の印加点の位置を十分な精度で得ることができることを示している。RIBAではこの原理に基づき、分布加重の圧力中心を求め、制御に利用している。

我々の触覚センサの空間インパルス応答の計測結果を図9に示す。ただし、計測に用いたセンサは素子間隔18mm、素子の弾性体中の深さ5mmで、力は直径8mmの円板にて加えた。また、x座標値は素子間隔で、垂直応力は直上での出力で正規化した。三次元状況でのインパルス応答なので式(1)の二次元的な状況には当てはまらないが、定性的には式(1)で得られるのと似た形状となっている。

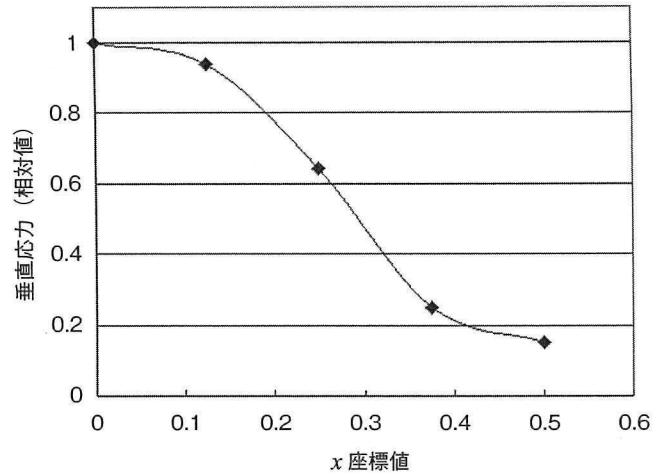


図9 われわれの触覚センサの補間能力の計測結果

4. おわりに

本稿では、介護支援ロボットRIBAの触覚情報の計測を中心に、ロボットがアナログである現実世界で動作を行うために、コンピュータで処理可能なデジタルとアナログの間でどのように情報変換を行っているかを述べた。目的に対して必要な情報が欠落しないように、分散処理構造を採用することにより時間方向に関しては十分な高速化を行っている。一方、圧力分布に関しては、触覚センサの構造上の制約から空間方向に荒い精度でサンプリングされた観測データしか得られないが、これによっても、十分な精度で圧力の印加位置の推定が行えることを示した。また、被介護者や環境に関する規格化が最も困難な情報は、人間が情報処理ループに入り込み、人間の認識結果をロボットに伝える方法を取っていることを説明した。

(原稿受付 2011年5月5日)

●文献

- (1) Mukai, T., Hirano, S., Nakashima, H., Kato, Y., Sakaida, Y., Guo, S., and Hosoe, S., Development of a Nursing-Care Assistant Robot RIBA That Can Lift a Human in Its Arms, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2010-10), 5996-6001.
- (2) Zyada, Z., Hayakawa, Y., and Hosoe, S., Model-based Control for Nonprehensile Manipulation of a Two-Rigid-Link Object by Two Cooperative Arms, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, (2010-12), 472-477.
- (3) Mukai, T., Hirano, S., Yoshida, M., Nakashima, H., Guo, S., and Hayakawa, Y., Tactile-Based Motion Adjustment for the Nursing-Care Assistant Robot RIBA, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2011)*, (2011-5), (in printing).
- (4) 日本ロボット学会編, 新版ロボット工学ハンドブック, (2005), 654, コロナ社.
- (5) Mukai, T., and Kato, Y., 1 ms Soft Areal Tactile giving Robots Soft Response, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **20-3** (2008), 473-480.
- (6) Fearing, R.S. and Hollerbach, J. M., Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing, *The International Journal of Robotics Research*, **4** (1985), 40-54.

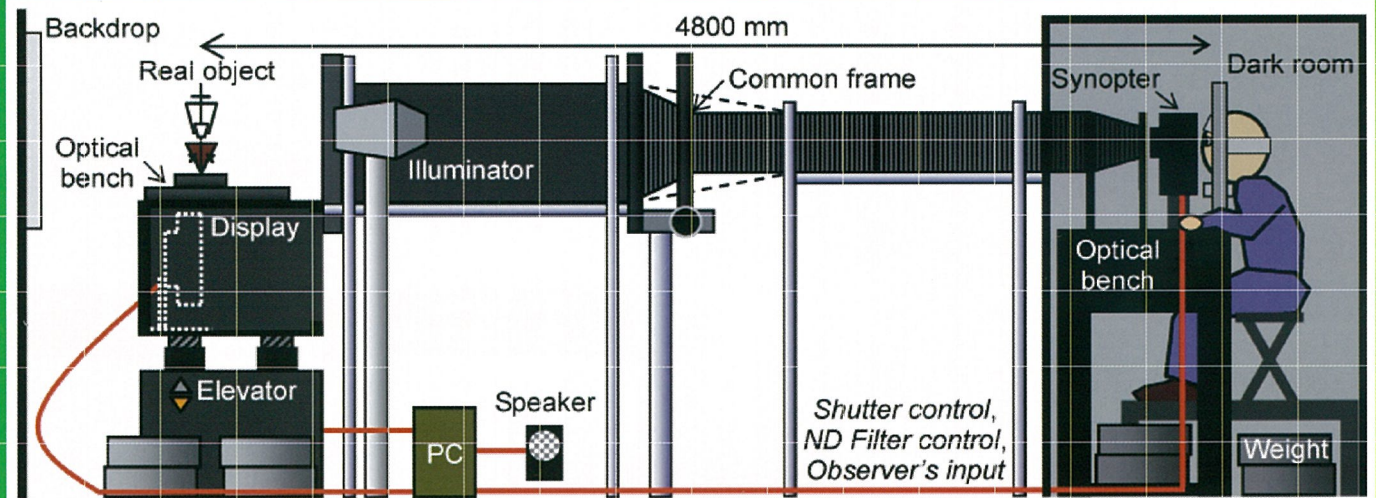
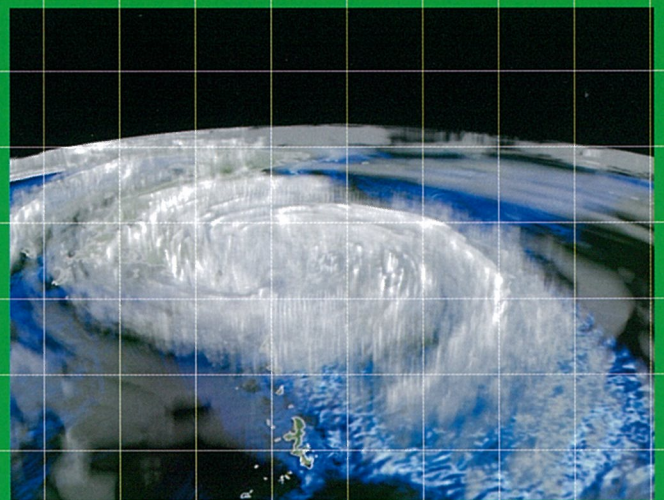
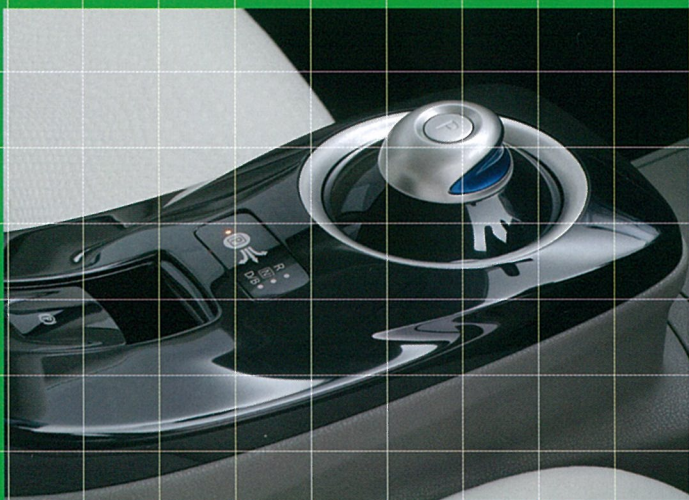


日本機械学会誌

Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers

機械技術者の情報誌

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



小特集

アナログからデジタルへ

—進化するデジタルはアナログ世界にどう向き合うか—

- 巨大地震と津波から国民と国土を護るための基本方針を提言
- 2011年度日本機械学会フェロー適任者／標準事業貢献賞・国際功績賞・コードエンジニア賞／「機械遺産」候補 推薦のお願い
- 2011年度計算力学技術者(CAE技術者)1級・2級認定試験および付帯講習案内

2011
7

Vol.114
No.1112