

センサルームを用いた人の日常活動の頑健な観察とその応用

西田 佳史^{†1 †2} 相澤 洋志^{†3} 北村 光司^{†4}
堀 俊夫^{†1 †2} 柿倉 正義^{†3} 溝口 博^{†4}

†1 産総研 デジタルヒューマン研究センター †2 CREST, JST
†3 東京電機大学 †4 東京理科大学

あらまし 本稿では、日常生活空間で行われる人の活動を頑健に観察する手法として、対象物センサ化に基づく活動観察手法を述べる。対象物センサ化とは、物体の認識問題と、行動認識の問題を分離し、前者を、環境センサ化やタグ付け問題に帰着させ、頑健な物体認識技術をベースとして、後者の行動認識技術やその応用技術を開発するアプローチであり、日常生活空間に存在する対象物を、その性質を維持しつつ、日常活動を観察するセンサとして扱うことで、観察範囲と行動解釈範囲を局所化させる手法である。本稿では、対象物センサ化を可能とする超音波3次元タグシステムと、超音波3次元タグによる対象物の位置推定アルゴリズムを述べ、精度検証実験の結果を示す。また、超音波3次元タグを用いて構築した対象物センサ化システムとその応用を述べる。

Robustly Observing Human Activity by Sensor Room and Its Application

Yoshifumi Nishida^{†1 †2}, Hiroshi Aizawa^{†3}, Koji Kitamura^{†4},
Toshio Hori^{†1 †2}, Masayoshi Kakikura^{†3} and Hiroshi Mizoguchi^{†4}

†1 Digital Human Research Center, AIST †2 CREST, JST
†3 Tokyo Denki University †4 Tokyo University of Science

This paper describes "object sensorization" as a new method for robustly observing human activities in a daily environment. The object sensorization enables to 1) decouple the problem of object recognition and that of behavior recognition, 2) resolve the former by 3-D tagging/sensorizing technology, and 3) develop a model for recognizing human activities while avoiding the problem of object recognition. This paper shows an object sensorizing system consisting of an ultrasonic 3D tag system which is a kind of ultrasonic location sensor, and its application. Algorithms for estimating positions of objects tagged by the ultrasonic 3D tag system and experimental results are reported in detail.

1. 緒論

今日、私たちの身の回りにある多くの家電機器がデジタル制御され、ネットワーク技術によってこれら個々のシステムを統合することで、より大規模なシステムを構築することが容易になってきている。このような技術の背景に、人とメカトロ機器、人とロボット、また、それらの総体としての人と環境といった、人間をその要素として含んだ環境型システムにおいて、人間を中心とした新しい機能を実現するためのシステムの分析手法や統合手法の確立が求

められている。

本研究は、センサを日常環境中に埋め込むことによって日常環境そのものをセンサ化(センサライゼーション技術)することで人の日常活動を入力することができ、人間機能モデル(デジタルヒューマンモデリング技術)を使うことによって人の運動/機械的・生理/解剖的・心理/認知的状態を認識でき、認識された内容に基づいて適切に情報提示(デジタルヒューマン提示技術)できる環境(人間機能高進環境: Enabling Environment)の構築技術の確立を目指し

ている。

人間・環境システム系の振る舞いを記述するために、観察による外乱を与えず、人の活動をそのままに観察し、認識する技術が必要となる。人間・環境システムにおける人の活動を、環境中の様々な対象物の機能の利用現象という観点から捉えると、対象物を頑健に認識することが可能となる。

そこで本研究では、センサを対象としたい現象のできるだけ近くに配置し、不要な信号が取り込まれることを避け、不要な信号に起因する認識の曖昧性を減少させることで、頑健な認識を可能とする環境センサ化がある。センシング技術の発展を背景に、生活空間を対象として、このような環境センサ化による人間の生活を観察する試みが実施されてきており、人の位置、状態や機器の使用等を頑健に検出できるようにになっている^{1) 2)}。

対象物をセンサ化する試みとしては、カップの底に取り付けられたセンサによって人に対して支援(例：水の温度を測る)を行う研究がされている³⁾。最近では、レストランでの応用を想定した水位計を備えたバッテリーレス化の研究の試みもされている⁴⁾。こうした応用分野が限定された研究は報告されているが、日常空間における対象物を利用する人間活動の体系的な観察・認識手法は扱われていない。

本稿では、日常環境中で行われる活動の中でも、対象物を利用する人の活動に焦点を当て、人の活動を対象物の機能に基づいて観察し、記述し、認識する手法について述べる。

第2章で、実世界における人間観察・認識の困難性について述べ、これを解決する認識方法として、上述したタグベースの行動観察・認識アプローチに基づく対象物のセンサ化について述べる。対象物のセンサ化とは、対象物の性質を維持しつつ、対象物を利用する際に生じる随伴行動を頑健に認識し、結果を出力することができる行動センサとしての性質を対象物に付け加えることである。

第3章ではタグベースの行動観察・認識アプローチを可能とするシステムとしてこれまでに開発してきた超音波式3次元タグシステムについて述べる。超音波式3次元タグシステムは、無拘束・実時間で人の活動を観察することを目的に、環境中の対象物に無線式超音波発信器を取り付け、環境中に埋め込まれた受信器を使って、対象物の3次元位置と対象物に割り振られたIDを計測するシステムである。超音波を用いた位置検出システムとしては、Active Bat⁵⁾が提案されており、人に超音波発信器を取り付けることによって人の位置を検出することに基づ

いたサービスの研究を実施している。また、SHIHらは、同様のシステムの開発を行い、位置推定手法としてDirect Substitution Method⁶⁾を提案している。これに対して、本研究では、環境中の対象物をセンサ化し、人の日常活動を観察し・認識する目的で用いる。

第4章では、超音波式3次元タグシステムによる冗長な距離情報を用いて計測される3次元位置推定方法とこれを用いた評価実験について述べる。

第5章で超音波式3次元タグシステムとステレオビジョンを用いて構築した対象物センサ化システムとその応用について簡単に述べる。

2. 対象物のセンサ化に基づく人の日常活動の認識

本章では、現実世界における人間活動の観察・認識の困難性について述べ、これを解決する認識方法として対象物センサ化について述べる。

2-1 実世界における人間活動の観察・認識の困難性

一般に、行動の認識は、パターン認識問題の一種として、確率論的に以下のように定式化することが可能である。

$$P(\hat{W}|Y) = \max_{W_i} \frac{P(Y|W_i)P(W_i)}{P(Y)} \quad (1)$$

ただし、 $P(\hat{W}|Y)$ は、観察された行動パターン Y の意味内容が W_i である確率、 $P(Y)$ は Y が観察される確率、 $P(W_i)$ はある意味を持った行動仮説 W_i が発現する確率、 $P(Y|W_i)$ は行動仮説 W_i に対して行動パターン Y が観察される確率である。式(1)により、最大確率を与える行動仮説 $\hat{W}$ を探索することが行動の認識である。この際、認識率を高めるため、あるいは、実時間性を保証するために、どのようにして最大確率の探索範囲を限定するか、すなわち、実世界で起こりうる膨大な行動仮説の中からあり得る仮説 W_i の範囲に、どのようにして制約条件を付加するかが問題となる。これが実世界における行動認識を難しくさせる1つ目の課題として挙げられる。

また、そもそも行動パターン Y が頑健に計測できなければ、上述の計算は意味をなさないで、実世界における行動の頑健な観察手法の開発が2つ目の課題として挙げられる。

2-2 対象物の性質を利用した行動認識

本節では、対象物の性質を分析し、前節の困難性を解決する方法を導く。

2.2.1 対象物の性質

一般にあらゆる対象物は以下の性質を持つ。

1. 位置の一意性：ある瞬間に実世界でユニークな位置に存在している。
2. 属性：名前・形・色・形・重さなどの属性を持っている。
3. 機能性：存在意義があり、人が利用する固有の機能を持っている。特に人工物では顕著である。
4. 属性・機能の対象物一体性：物理的存在として、存在する位置において属性を表出し、固有の機能を果たす。

対象物の属性による対象物認識の問題を解かずに、もし何らかの方法によって、対象物にIDを割り付け、その位置が検出できれば、対象物の上述の性質を利用して、以下で述べるような頑健な実時間行動計測と探索範囲限定による効率的な行動の認識を実現することが可能となる。

2.2.2 対象物の性質を利用した行動認識

効率的な信号収集を可能とする「対象物位置ベースとした観察」 頑健な行動の観察を実現するためには、人の行動の現象をセンサを用いて観察し、信号として計算機に取り込む必要がある。この際、現象の観察に関連のない信号を含めてあらゆる信号を取り込む方法は計算コストを増大させ、曖昧な解釈結果を生む原因になる。これを回避する方法として、対象物の機能を利用する行動が生じる対象物にセンサを取り付けることによって、最も頑健で効率的な行動の観察が可能である。必要なセンサ情報だけが得られ、対象物のIDとセンサ信号が結びつく(どの対象物のセンサ信号かが自明)からである。同様に、直接センサを取り付けなくても、観察したい対象物がどこにあるかがわかっている場合、ある時刻における実世界の同一の位置からの情報は同一の対象物からの情報と考えられるため、対象物の位置がわかっているれば、その対象物の状態を計測するために、その位置またはその周辺のみを計測することで、効率的な信号収集が可能である。例えば、位置をベースとすることで、対象物を計測するための異種センサ間での情報統合も可能である。

効率的な情報解釈を可能とする「対象物の属性・機能をベースとした解釈」 得られているセンサ信号が、どの対象物からの信号であるかわかっている場合、どんな属性(重さ・テクスチャ・形)を持つ対象物であるかをあらかじめ知識として持っておくことによって、その対象物に固有の状態変化だけを解釈することによる効率的な情報解釈が可能である。ま

た、どんな機能を機能を持つ対象物であるかの知識を使って、人が利用した対象物の固有の機能によって制約された範囲で人の行動を認識することが可能である。すなわち、解釈すべき行動仮説の範囲を限定することが可能となる。

2.3 対象物センサ化の概念

本研究では、Fig. 1に示すような対象物センサ化システムを提案する。

対象物センサ化システムとは、日常環境中に存在する対象物をその性質を維持しつつ、日常活動を観察するセンサとして扱うことである。観察範囲と行動解釈範囲を局所化させ、頑健で効率的な行動観察と解釈を可能とするものである。具体的には、日常環境中に存在するコップ、ホッチキス、椅子、ゴミ箱などの対象物に位置検出用のビーコン、ID番号、必要の場合はセンサを持たせ、計算機上で記述された対象物の属性や機能に関する知識やメソッドからなる仮想オブジェクトと環境中の対象物(実オブジェクト)とを頑健に結びつけることで、前節で述べた1) 対象物の位置をベースとした観察機能、2) 対象物の属性・機能をベースとした解釈機能を実現するシステムである。

このような実オブジェクトは、対象物の性質を維持しつつ、行動を計測し、認識された行動を出力することができる一種のセンサと考えられるので、対象物に実際にセンサが付けられているかどうかに関わりなく、本稿では、「対象物センサ」と呼ぶことにする。

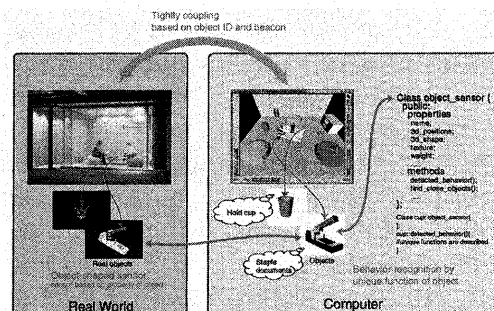


Fig.1 Concept of object sensorizing system

式 (3) - 式 (2) より球の交線が存在している平面の方程式を導くことが可能である。

$$2(x_j - x_i)x + 2(y_j - y_i)y + 2(z_j - z_i)z = l_i^2 - l_j^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 + x_j^2 + y_j^2 + z_j^2 \quad (4)$$

i, j を適当に選ぶことによって以下の連立方程式が得られる。

$$AP = B \quad (5)$$

ただし

$$P = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$A = \begin{pmatrix} 2(x_0 - x_1) & 2(y_0 - y_1) & 2(z_0 - z_1) \\ 2(x_0 - x_2) & 2(y_0 - y_2) & 2(z_0 - z_2) \\ 2(x_0 - x_3) & 2(y_0 - y_3) & 2(z_0 - z_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$B = \begin{pmatrix} l_1^2 - l_0^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ l_2^2 - l_0^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ l_3^2 - l_0^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$P = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (9)$$

このように最小 2 乗法によって $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ を推定することが可能である。この方法によって解が求められる条件は以下になっている。具体的な処理手順について、Fig. 4 に示す。

- 同一平面にない最低 4 個の超音波受信器の測定データがある場合：解を一意に決めることが可能
- 同一平面上にない 3 個の超音波受信器の測定データがある場合：2 個の解を求めることができるので、あらかじめ適当な解が存在する空間の位置を拘束条件として定義しておくことで、送信器の 3 次元位置を求めることが可能
- 同一直線上に並んだ超音波受信器の測定データしか得られない場合：解は無数に存在し、解を定めることができない。

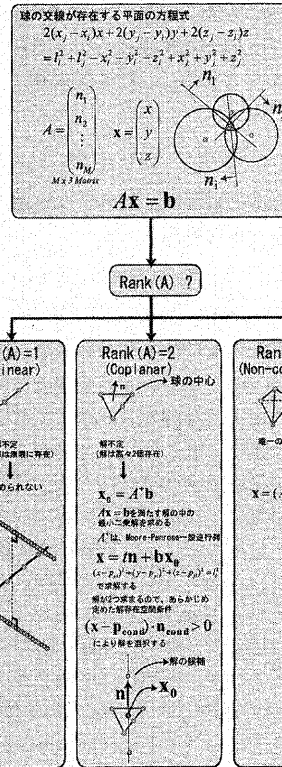


Fig.4 Proposed algorithm based on least square method

4.2.2 Least Median of Squares 法を用いた口バスト推定

最小 2 乗法を用いた方法は、外れ値がある場合には、この影響を大きく受ける手法である。外れ値を含む計測データから外れ値を検出し、この外れ値を取り除く Least Median of Squares (LMedS) 法を超音波式 3 次元位置計測システムへ適用した。LMedS 基準によるパラメータの推定は、非線形の最適化問題となるので、高速化のために準最適解をランダムサンプリングによって探索する Random Sample Consensus 法を適用する。以下に手順を示す。

1. 全計測データの中から 3 個のデータをランダムに選ぶ。
2. 式 (4) を使って、2 次元の連立方程式を解き、3 次元位置 (x, y, z) の候補を導く。
3. 得られた (x, y, z) を以下のように評価する。得られた (x, y, z) と計測が可能だった全受信器の座標から、候補座標と受信器の間の距離を計算する。さらに、実際の計測データとの差を求

め、得られた集合から中央値を求める。

4. 1～3を決めた回数繰り返し、得られた最小の中央値を与えた (x, y, z) を最適解 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ として採用する。

$$\text{LMedS} = \min \text{ med } |\varepsilon_i| \quad (10)$$

4.3 日常生活空間型検証システムを用いたアルゴリズム評価実験結果

天井に取り付けられた48個の受信器と対象物型センサを用いて以下で述べる評価実験を行った。

4.3.1 部屋サイズでの3次元位置推定の誤差評価

4.0 × 4.0 × 2.7mの空間で、視覚式のモーションキャプチャによって計測された点と試作した超音波3次元位置計測システムによって計測された点の差を計算し、各座標値のずれの大きさを誤差とした。各計測点の誤差は、同じ場所で30回サンプリングした平均値から求めている。空間での計測点は1400点である。Fig. 5は、1400点の誤差データをもとにして線形補完等高線図で表したものである。青色のエリアでは誤差が小さく、赤色のエリアでは誤差が大きい。黒い四角で囲まれているエリアは、天井に超音波受信器が取り付けられている範囲である。四角いエリア内における誤差は約20mm～80mmである。

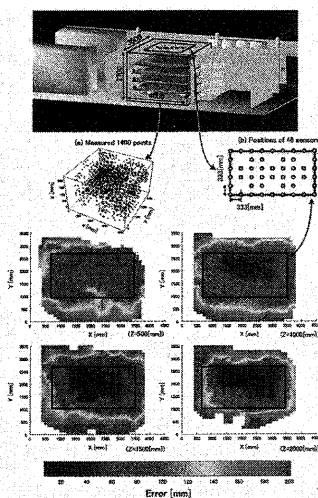


Fig.5 Error estimated position

4.3.2 手によるオクルージョンの影響評価

本システムを利用する際に最もよく起こる測定値への外れ値の混入は、手による隠れが生じた場合である。そこで、手による隠れの影響が発生している

場合の3次元位置推定値の性能評価を行った。超音波受信器が取り付けられた物体の上に手をかざし隠れを生じさせることによる性能評価を行った。Fig. 6は、手の隠れによる性能評価を示している。x軸は、手と対象物の距離を示している。y軸(第一項目軸)は、誤差を示している。y軸(第二項目軸)は、有効な超音波受信器の数を示している。青線はLMedS法を示しており、緑線は最小二乗法の結果を示している。赤線は、有効な超音波受信器の数を示している。対象物と手が近づくにつれてオクルージョンが発生し、超音波を受信できるセンサの数が減少していくこと、両手法とも、対象物と手の距離が遠い場合には誤差が小さく(40mm)、対象物と手の距離が近い場合には誤差が大きくなり、分解能が小さくなることからわかる。これらの結果から、(1)オクルージョン発生時には、手による反射の影響が大きくなり、外れ値の割合が高くなること、(2)冗長な距離情報を利用したロバスト推定法を用いることによって、影響を軽減できることを示している。

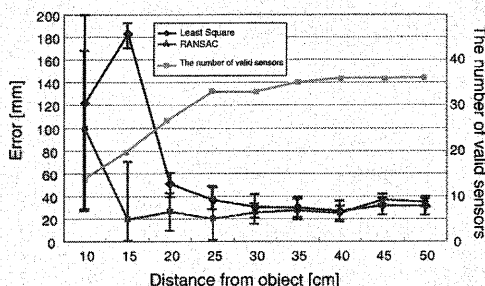


Fig.6 Estimation of estimate of 3D position in occlusion

4.3.3 選択的発信による高速サンプリング維持機能

Fig. 7では、各対象物のサンプリング周波数を擬似的に高く維持するために人の手に超音波送信器を取り付け、その手の近傍(200mm)にある超音波送信器だけを動かすことによって対象物の位置を計測している様子を示している。図中の赤玉は手の位置を示している。高速サンプリング維持機能としては、本稿で述べたように超音波を時分割で発信させる方法ではなく、複数の同一の周波数の超音波を同時に発信させるアルゴリズムの開発¹⁰⁾を行っており、3個程度の送信器から同時に超音波を発信させたとしてもそれぞれの送信器の3次元位置を計測可能である。

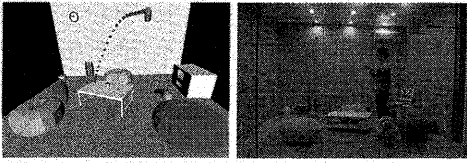


Fig.7 Dynamic selection of objects to be measured

5. 超音波式 3 次元タグとステレオ視を用いた対象物センサ化システムの構築

5.1 超音波式 3 次元タグとステレオ視を用いた対象物センサ化システムの構築

本研究で構築した対象物センサ化システムは、前節の機能を実現するための以下に述べる 3 つの階層から成り立っている。システムの概要を Fig. 8 に示す。

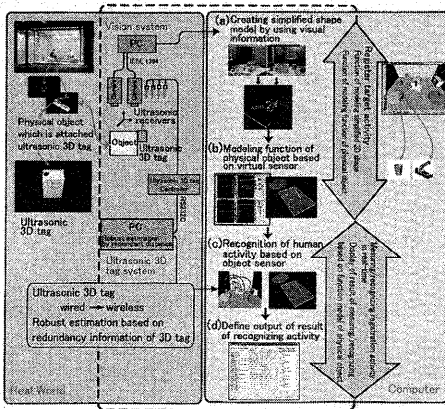


Fig.8 Configuration of object sensing system constructed using ultrasonic 3D tag and stereo vision

1. 物理的センサ層：対象物認識と対象物探索を行う階層で、第 3 章で述べた超音波式 3 次元タグと、第 4 章で述べた位置推定アルゴリズムを用いて実現する。

2. 仮想センサ層：対象物の機能モデル化する層で、ヴィジョンを用いた簡易形状モデル、あらかじめ用意された仮想センサ・仮想効果器群、仮想センサ・効果器を処理するための基本メソッドからなる。ステレオヴィジョンを用いて、2 枚の画像を基に計算機上でマウスを用いて対話的に対象物の円形・多角形・線などで表される特徴的な 3 次元形状を定義し登録することが可能である。このように定義された簡易形状に対して、3 次元タグの位置情報と仮想セ

ンサと仮想効果器を付け加えていくことで、対象物の機能を簡易にモデル化可能である。仮想センサとして、姿勢やリンクの角度を検出するセンサ、接触を検出する接触センサが用意されている。

3. 対象物センサ層：定義された対象物の機能モデルに、物理的センサ層である超音波 3 次元タグシステムが出力する位置と ID 情報を入力することで、実時間で行動認識結果を得るための階層である。

5.2 対象物センサ化システムを用いた人の日常活動の認識実験

Fig. 9 は、構築した対象物センサ化システムを用いて部屋に置かれた複数の対象物を移動したときの軌跡を示している。また、下に示されている出力結果は、対象物を移動したときの対象物センサ化システムの出力結果である。これらの結果は、超音波式 3 次元タグに用いている位置推定アルゴリズムによって、測定中に生じる隠れや反射の影響を軽減し、対象物の動きを確実に計測できることを示している。また、出力結果から、人の行動認識が頑健に行えているかがわかる。

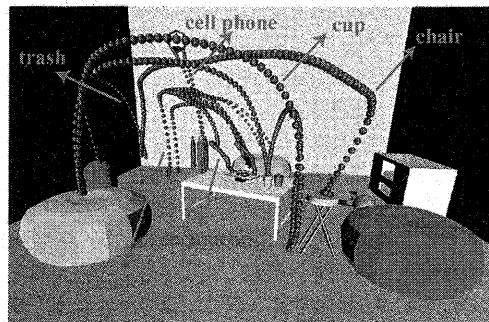


Fig.9 Recognition of daily human activity based on object shaped sensors

Output: ...,04:03:55 place yellow cup on desk, 04:04:05 hold cell phone, 04:04:12 place cell phone on floor, 04:04:19 hold chair, 04:04:31 place chair on floor, 04:04:34 hold trash, 04:04:40 place trash on floor 04:04:46 hold stapler, 04:04:52 place stapler on desk, 04:04:59 hold documents, 04:05:13 fix document with stapler,...

5.3 対象物センサ化システムを用いた Behavior-to-speech

人の日常活動が頑健に認識できるようになれば、これを応用することによって人の日常生活を科学的に考察したり、モデル化し製品開発や評価のための

シミュレーションを行うなどの研究が考えられる。筆者らはこうした応用の基礎となる認識技術そのものがサービスになり得るのではないかとこの観点から、Behavior-to-speech エンジンの開発を行っている。これは、認識された日常行動を Text-to-speech エンジンと統合することで、実時間に発話させる機能を実現するソフトウェアであり、視覚障害者への学習支援や実体と実行動による語学学習支援などの応用が考えられる。

6. 結論

本稿では、日常環境で行われる人の活動を頑健に観察し、認識する手法として環境中の対象物を扱う人の活動の認識に焦点をあて、日常環境中に存在する対象物をその性質を維持しつつ、日常活動を観察するセンサとして扱うことで、観察範囲と行動解釈範囲を局所化させ、頑健で効率的な行動観察と解釈を可能とした。対象物センサ化やタグ付け問題に帰着させ、頑健な対象物認識技術をベースとして、後者の行動認識技術やその応用技術を重点開発するという新しいアプローチであり、具体的には、対象物に位置計測のためのビーコンを持たせ、また、ID を割り付けることで、対象物認識・位置推定問題の特徴量ベースの手法で解決することを避けハードウェア的に解決する。

3次元位置推定アルゴリズムによる評価実験では、冗長な距離情報を利用した3次元位置推定方法として最小2乗法とLMedS法による推定手法を開発システムに適用した。LMedS基準によるパラメータの推定は、非線形の最適化問題であるので、高速化のために準最適解をランダムサンプルによって探索するRandom Sample Consensusを適用した。3次元位置推定の誤差評価では、天井に取り付けられた受信器の下では、誤差が20mm～80mmであることを確認した。オクルージョンの影響評価では、対象物と手の距離が近い場合には反射の影響が出るが、冗長な距離乗法を用いたロバスト推定法を用いた場合には、手による反射の影響を軽減できることを確認した。

今後の課題として、環境中に取り付けられた視覚センサとの情報統合、計測された行動データを用いた行動予測技術への展開、行動観察技術に基づくアプリケーションの開拓や、本稿で提案したアプリケーションの現場検証、などが挙げられる。

参考文献

1) T. Mori, K. Asaki, H. Noguchi, T.

Sato: Accumulation and Summarization of Human Daily Action Data in One-Room-Type Sensing System, *Proc. of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2001)*, pp. 2349-2354, 2001

2) <http://www.cc.gatech.edu/fce/ahri>

3) <http://mediacup.teco.edu>

4) P. H. Dietz, Darren Leigh, William S. Yerazunis: Wireless Liquid Level Sensing for Restaurant Applications, *Proc. of IEEE International Conference on Sensors*, 62.6, 2002

5) A. Hopper, P. Steggle, A. Ward, P. Webster: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. of 5th Annual Int' Conf. Mobile Computing and Networking (Mobicom 99)*, pp. 59-68, 1999

6) S. Shih, M. Minami, H. Morikawa, T. Aoyama: An Implementation and Evaluation of indoor Ultrasonic Tracking System, 電子情報通信学会総合大会, B-7-20, 2001

7) 西田, 相澤, 堀, 柿倉: 超音波式3次元タグを用いた人の日常活動の頑健な計測～冗長なセンサ情報をに基づくロバスト位置推定～, 第20回日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会予稿集, 3C18(1)-(4), 2002

8) K.C. Ho: Solution and Performance Analysis of Geolocation by TDOA, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 4, October 1993, pp. 1311-1322

9) D.E. Manolakis: Efficient Solution and Performance Analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 32, No. 4, October 1996, pp. 1239-1248

10) T. Hori, Y. Nishida, T. Kanade, K. Akiyama: Improving Sampling Rate with Multiplexed Ultrasonic Emitters, *Proc. of 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2003 (in press)