

Enabling Environment

—3次元タグに基づく人の日常活動の観察と認識機能—

西田 佳史 堀 俊夫

{y.nishida|t.hori}@aist.go.jp

Abstract: This paper describes a new approach to daily human activities recognition: 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 behavior from such sensorized objects. This paper proposes “an object sensorizing system” which realizes a function for robustly observing and recognizing daily human activities using real-object-shaped sensors. The object sensorizing system is constructed using an ultrasonic 3D tag system the authors have developed and a stereo vision system. The constructed object sensorizing system consists of three layered components. 1) Physical sensor layer: the ultrasonic 3D tag system outputs ID and 3D positions of objects. This function contributes to avoiding a problem of feature-based object recognition. 2) Virtual sensor layer: physical characters of real objects are abstracted through simplifying their 3D shape and unique functions using prepared virtual sensors. The stereo vision system is used for simplifying their 3D shape. 3) Object sensor layer: by defining behavior to be recognized using the abstracted objects, this layer enables to create object-shaped sensors which are added a new function for outputting recognized behavior while maintaining their original functions. This paper also describes the ultrasonic 3D tag system, algorithms for estimating 3D position, and its experimental results in detail.

1 緒論

今日、私たちの身のまわりにある多くの家電機器が計算機でデジタル制御され、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容易に構築することが可能となってきた。このような技術の発展を背景に、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。

このようなシステムの分析、あるいは、統合手法のアプローチとして、人間の持つ基本機能である心理/認知的機能、解剖/生理的機能、機械/運動的機能を統合的にモデル化し、人間支援機能を、計算機上に表象された人間機能モデル(デジタルヒューマン)に基づかせて開発していくというアプローチが可能となりつつある [1]。人間と環境の機能を計算機上でモデル化し、すでに電子化されている様々なメカトロ機器の機能とを統合することで、これまで困難であったより大規模な人・環境システムという系におけるシステム構成法が利用可能となれば、シミュレーションによる最適性の考察などの工学的な視点を持ち込むことが可能となり、人の機能の増進を支援する環境システムの設計と構築が容易になることが期待できる。

本研究は、センサを日常空間に埋め込み、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、人の自然な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)を使うことで、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)ができる環境(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。このようなデジタルヒューマン技術に基づいた人間機能高進環境は、たとえば、在宅健康増進システム、病室における簡易ICU化システム、独居高齢者の安全確保システム、語学教育支援システムなどの医療・福祉・教育分野での具体的な人間中心アプリケーションへの応用が期待できる。

人間・環境システムという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し、その状態変化を検出することで行動を認識することが可能であると考えられる。ところが、日常生活環境などの複雑な実世界を対象とした場合、対象物の位置を発見することすら極めて困難な課題であり、ヴィジョンに代表されるような特徴量ベースの従来の人間活動の観察・認識技術を適用しようとするとは限界がある。そのため、より上位の人間活動の認識や解析の問題を扱うために、従来の人物や物体の認識技術を基礎技術として用いることが困難であった。

これらの問題点に有効な方法として、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なっている [2, 3]。

家や部屋といった空間は、それらの構成要素である床・壁・天井といった空間を形づくる構造物や、さらに小さな対象物に分解可能である。このような対象物は、日常環境中に多く存在し、人が利用する機会が多いことから、人の活動を記述する上で重要であると考えられる。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情報によって人に対してサービス(例: 水の温度を計る。)を行う研究 [4] がある。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カップの研究がなされており、コイルを用いたバッテリーレス化の試みもなされている [5]。しかし、こうした応用分野が限定された研究は報告されているものの、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。

一方、近年、急速に進んでいる小型無線技術、ネットワーク技術を利用することで、環境中の様々な対象物をセンサ化することが可能となっている。小型無線技術、ネットワーク技術の需要の高さによる発展性を考えると、物体の認識問題と、行動認識の問題を分離し、

前者は、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重点開発するという新しいアプローチが可能になりつつあると言える。

本稿の目的は、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の認識に焦点をあて、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ことにあつた。まず、第2章で、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、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。本稿では、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を指している。

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開発してきた超音波式3次元タグ [8] について述べる。超音波式3次元タグは、実時間・無拘束に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、環境に埋め込まれた受信器を使ってその3次元位置と対象物に割り付けられたIDを計測するシステムである。超音波送受信器を用いた位置検出システムとしては、Active Bat [6] が提案されており、人に超音波発信器を取り付けることで、人の位置の検出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 Methodを提案している [7]。これに対して、本研究では、環境中の対象物をセンサ化し、人の活動を観察し、認識する目的で用いる。

超音波式3次元位置計測システムは、他の計測原理と比較して、低コストで受信器の数を増やすことができるため、数の増加によって、精度、分解能、頑健性を向上させる方法の開発は、低コスト型3次元位置計測システムに対し、重要な利点を提供できる。第4章では、超音波式3次元式計測システムに関して、従来の研究で扱われていない冗長な距離情報に基づく頑健な3次元位置推定法 [9] とその評価実験について述べる。

このような頑健な対象物の位置計測とID計測（物体認識に相当）、場合によっては、ある一つの対象物内の各構成物の位置計測やID計測が可能となれば、これをベースとして、対象物自身の状態変化や、対象物と対象物との間の状態変化が検出可能となり、第2章で述べた対象物センサ化を実現するシステムの構築が可能となる。第5章では、環境中の対象物をセンサ化することで、計測された対象物の位置とIDに基づいて人の活動を頑健に認識する対象物センサ化システムの検証システムとして、超音波式3次元タグとステレオビジョンからなる対象物センサ化システム [10, 11] について述べる。

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、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の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、確率的に以下のように定式化可能である。

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

ただし、 $P(W_i|Y)$ 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に、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、実世界で起りうる膨大な行動仮説の中からあり得そうな仮説 (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つ目の課題としてあげられる。

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の、実世界における行動の頑健な観察手法の開発が2つ目の課題としてあげられる。

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: ある瞬間には実世界でユニークな位置に存在している。1), 2), 3) の中で最も強い特徴。
- 2) 属性: 名前・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、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「対象物位置をベースとした観察」 頑健な行動の観察を実現するためには、ある行動の現象を確実に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直接センサを取りつけた場合は、もっとも頑健で効率の良い行動の観察が可能であるのは明らかである。必要なセンサ信号のみが得られるし、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とも、今、観察したい対象物がどこにあるかが分かっている場合は、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、対象物の位置が分かっていたら、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、対象物に取り付けられたセンサや環境から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」いま、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が分かっている場合、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つておくことで、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 対象物センサ化システム 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、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、日常生活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、必要な場合は、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）とを頑健に結び付けることで、前節で述べた 1）対象物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は関わりなく、本稿では、「対象物センサ」と呼ぶことにする。第 5 章で、超音波式 3 次元タグとステレオ視を用いて構築した対象物センサ化システムについて述べる。

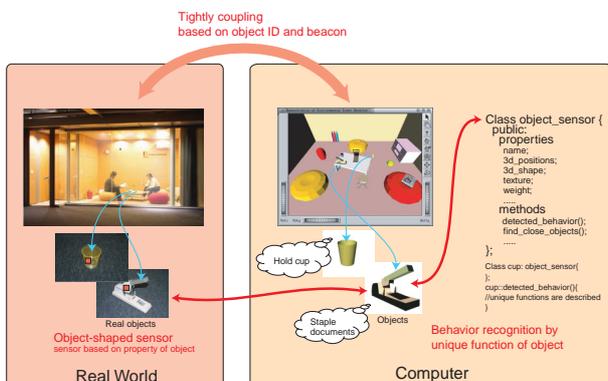


Fig 1: Concept of object sensorizing system

3 日常環境中の行動を頑健に計測する超音波式 3 次元タグの開発

3.1 超音波式 3 次元タグシステム

本章では、日常環境中の行動を頑健に計測することを目的として開発した超音波式 3 次元タグシステムについて述べる。

3.2 超音波式 3 次元タグシステムのハードウェア構成

システムのハードウェアの構成図を Fig.2 に示す。PC、ネットワーク部 (Hub)、Time-of-flight 計測部、超音波受信部、超音波送信制御部 (超音波式 3 次元タグ)、無線ユニットから構成されている。超音波受信部は、超音波送信部からの超音波パルスを受信し、増幅するために用いる。ネットワーク部は、Time-of-flight 計測部と超音波送信制御部に同期信号と計測すべき対象物の ID を送信するために用いる。同期信号は、超音波送信制御部へは、無線で送信され、Time-of-flight 計測部へは、有線で送信される。Time-of-flight 計測部は、同期信号を検出した時点から増幅された信号がある閾値を超えるまでの時間を計測するために用いる。対象物の 3 次元計測の原理は、超音波送信器から発信された信号を 3 個以上の受信部で受信し各々の受信部で超音波の到達時間を使って、lateration を行なうことにより対象物の 3 次元位置を測定するというものである。詳しい導出アルゴリズムについては、第 4 で述べる。

主な仕様は以下のとおりである。計測誤差 2~8[cm]。計測可能距離 7×7×7[m] の空間。サンプリング周波数は約 50Hz である。

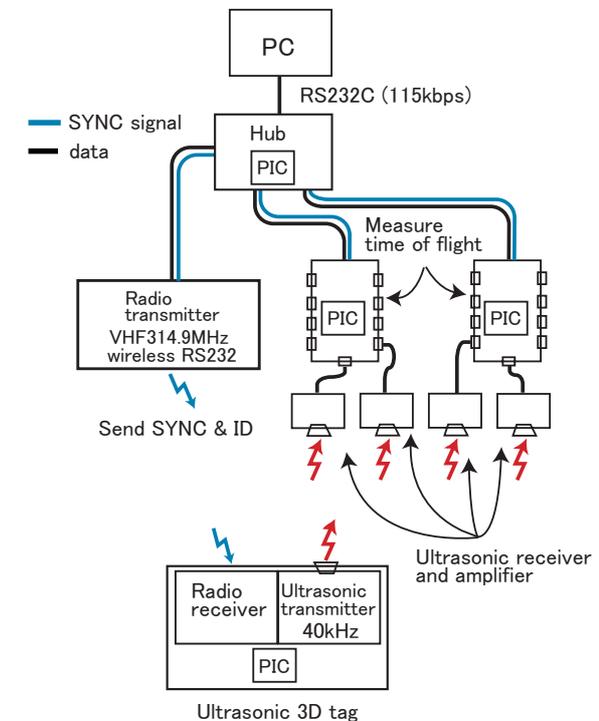


Fig 2: System configuration

Fig. 3 は、試作したネットワーク部、Time-of-flight 計測部の写真である。Fig.4 は、超音波送信制御部 (超音波式 3 次元タグ) である。無線ユニットとして、市

販売されている無線シリアルを利用した。大きさは、 $75 \times 50 \times 28$ [mm] である。電源としてアルカリ電池単三 2 本を使用しており、超音波式 3 次元タグの大半を占めている。消費電力は、待機モードで、 1 [mA] であり、連続発信時では、 6 [mA] である。アルカリ電池単三 2 本を使用した場合は、2 週間程度の連続発信、または、2.5 ヶ月程度の待機が可能である。消費電力の軽減させたり、リチウム電池を使うことによって、さらに小さくすることが可能であり、現在、開発を進めている。

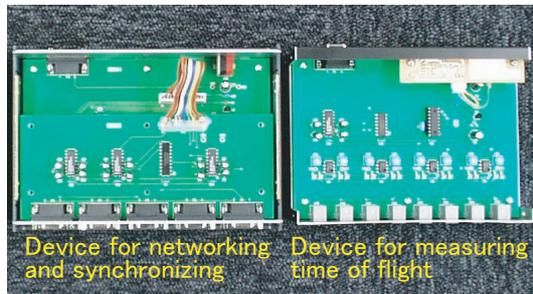


Fig 3: Hub, section for measuring time-of-flight

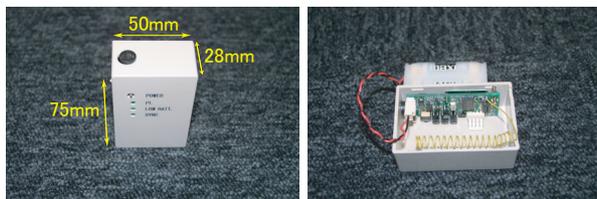


Fig 4: Ultrasonic 3D tag



Fig 5: Daily-living-space-shaped experimental system

3.3 日常生活空間型検証システムの構築

日常生活空間での開発アルゴリズムの検証、構築システムの機能の検証を目的に、日常生活空間を模擬した日常生活空間型検証システムを構築した。構築した日常生活空間型検証システムを Fig.5 に示す。この部屋の大きさは、幅 4.0m、奥行き 4.0m、高さ 2.7m である。天井と壁には合計 307 個の受信器が 333mm おきに取り付けられている。また、Fig.6 に示すように、部屋内にはコップ、椅子、ホッチキス、パンチ、書類、貯金箱、ゴミ箱、携帯電話などの対象物が置かれており、それらに送信器が 1 個 ~ 2 個取り付けられている。

4 冗長なセンサ情報を利用した高精度で頑健な位置推定アルゴリズム

本研究で試作した超音波式 3 次元タグシステムは、物体に超音波送信器を取り付け、天井や壁に取り付けた複数の超音波受信器で送信パルスを受信することによって物体とセンサ間の距離を計測し、物体の 3 次元位置を求める (Trilateration) が可能である。本章では、(1) Trilateration, (2) 3 個以上の冗長な距離情報から 3 次元位置を推定する Multilateration, (3) 冗長な距離情報に基づくロバスト推定 [14] を用いた Multilateration について述べる。

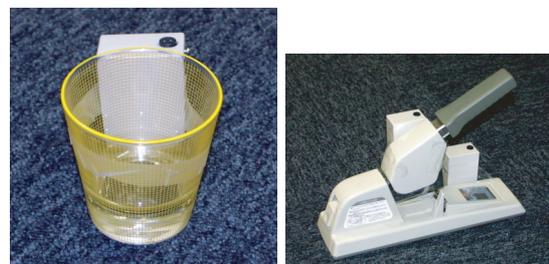


Fig 6: Objects with ultrasonic 3D tag

4.1 Trilateration

(x_i, y_i, z_i) に置かれた i 番目の超音波受信器の測定データを l_i とすると、超音波送信器の位置 (x, y, z) の間には以下の関係が成り立つ。

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = l_i^2, \quad (0 < i < n) \quad (2)$$

同一線上にない 3 個の受信器の距離情報から連立方程式を解くことによって物体の 3 次元位置を求めることが可能である。

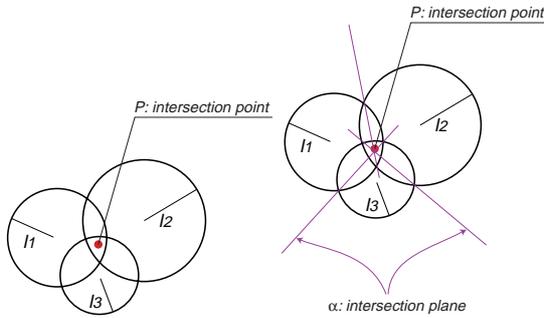


Fig 7: (a) Intersection point, (b) Intersection plane

4.2 Multilateration

4.2.1 基礎

(x_i, y_i, z_i) に置かれた i 番目の超音波受信器によって測定された距離データが l_i のとき、超音波送信器の位置との間の関係は式 (2) になる。このときの誤差を ϵ_i とすると、

$$\epsilon_i = \left| l_i - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \right| \quad (3)$$

と書ける。式 (4) を解くことによって、 (x_i, y_i, z_i) の最適値 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ を推定することができる。

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = \min \sum_i^n \epsilon_i \quad (4)$$

式 (4) の最小化問題は、非線形方程式を解くことになり、解析的には解けない。そのため、繰り返し計算を行う必要がある。SHIH ら [7] は、 (x, y, z) を何点かランダムに選んで式 (9) に代入し、誤差が最小となる時の (x, y, z) を最適値として採用するという Direct Substitution Method を提案している。推定法としては、M-estimator と呼ばれるロバスト推定の一に相当する。しかし、Direct Substitution Method では、試行する回数に比例して精度があげられるものの、最適値からの誤差をある値以下になるように保証しようとすると¹、多大な試行が必要となるといったデメリットがある。

¹たとえば、99%以上の確率で、誤差をある範囲以内であることを保証しようとした場合、保証する誤差によらず、全ての (x, y, z) を代入するのと同様同じ試行が必要となる。3x3x3[m] の空間で、10[cm] 以内の誤差であることを 90%保証するには、約 15000 回の試行が、99%保証するには、約 30000 回の試行が必要となる。

4.2.2 球と球の交線が存在する平面を利用した方法

ここでは、実時間で推定が可能なアルゴリズムを導くために、誤差の最小化問題を線形化する。

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 = l_i^2 \quad (5)$$

$$(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2 = l_j^2 \quad (6)$$

式 (5)-式 (6) より球の交線が存在している平面の方程式が以下のように導かれる。

$$2(x_j - x_i)x + 2(y_j - y_i)y + 2(z_j - z_i)z = l_i^2 - l_j^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 + x_j^2 + y_j^2 + z_j^2 \quad (7)$$

(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。

$$\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{B} \quad (8)$$

ただし

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 2(x_0 - x_1) & 2(y_0 - y_1) & 2(z_0 - z_1) \\ 2(x_0 - x_2) & 2(y_0 - y_2) & 2(z_0 - z_2) \\ 2(x_0 - x_3) & 2(y_0 - y_3) & 2(z_0 - z_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} l_1^2 - l_0^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ l_2^2 - l_0^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ l_3^2 - l_0^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (12)$$

よって、最小二乗法による $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ が推定することが可能である。この推定法では、球の交線が存在する平面群との距離の二乗和の最小値を与える解として求めていることを示している。

この方法によって解が求められる条件は以下のとおりである。

- 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:
解を一意に求めることが可能である。
- 同一直線上にない 3 個の超音波受信器の測定データがある場合:
高々 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（たとえば、天井裏には発信器は存在しない、など）で、発信器の 3 次元位置を求めることが可能である。
- 同一直線状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。

具体的な処理の手順を図 8 に示す。

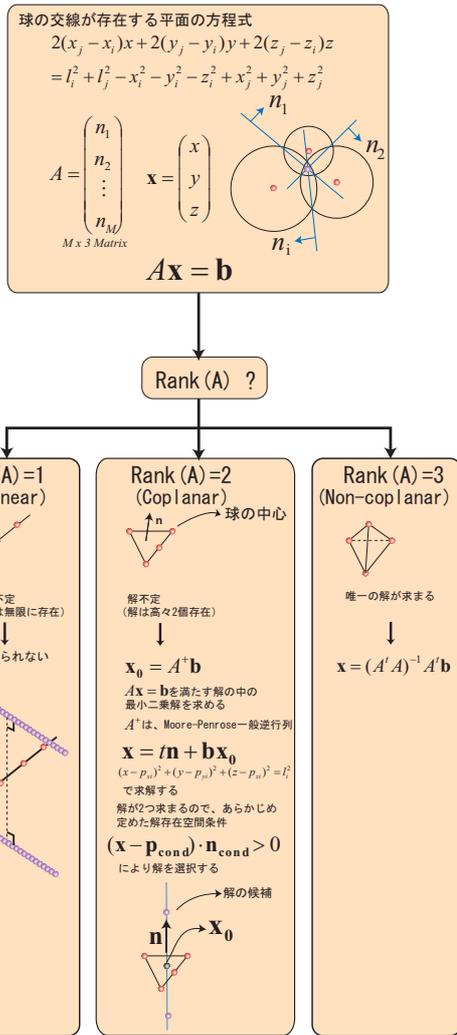


Fig 8: Proposed algorithm based on least square method

4.3 Least Median of Squares 法を用いたロバスト推定の適用

最小二乗法を用いた方法は、誤差の分布が正規分布に従わない。つまり、外れ値がある場合には、この影響が強く出る手法である。外れ値を含む計測データから、外れ値を検出し、この外れ値を除く Least Median of Squares(LMedS) 法や、誤差に適切な重み付けをする M-estimator などのロバストな推定方法が開発されている。本研究では、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. 全計測データ数の中から 3 個のデータをランダムに選ぶ。
2. 式 (7) 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。

$$LMedS = \min \text{med} |e_i| \quad (13)$$

4.4 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

天井に取りつけられた 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なった。

4.4.1 位置計測分解能の測定

Fig.9(左) は、第 4 章で述べた最小二乗法に基づいた対象物の 3 次元位置検出のばらつきを評価した実験の結果を示している。この図は、超音波発信器が取り付けられた対象物を一定の場所に置き、3 次元位置を 1000 回測定することで、確率密度を計算した。x, y 軸は、2 × 2mm ごとに区切られており、縦軸は、その場所の確率密度を示している。ただし、ここでの xy 平面は床平面、z 軸は床法線方向である。図より、x 方向、y 方向の分解能は 15mm 程度であることがわかる。Fig.9(右) は、z の座標値について、xy 平面と同様にばらつきを評価した結果を示している。この図から z 座標に関しては、5mm 程度の分解能を有していることが確認できる。

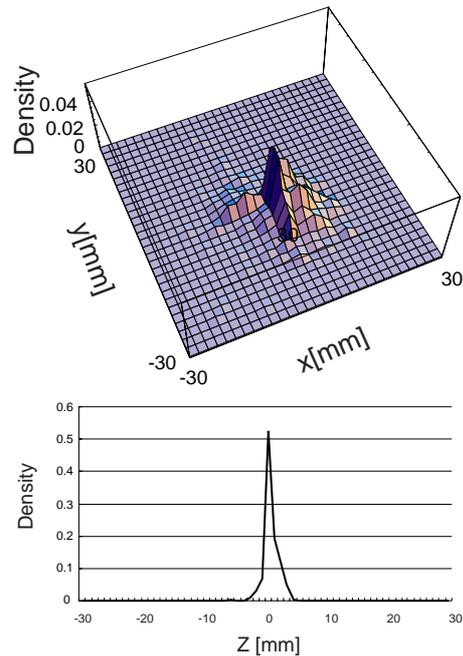


Fig 9: Probability density of calculated coordinates x, y, and z

4.4.2 最小二乗法と LMedS 法による 3 次元位置推定の性能評価

計測された距離データの内 1 つをランダムに選び、外れ値として 500mm を加算した場合の推定値を調べることで、最小二乗法と LMedS 法による 3 次元位置

推定の性能評価を行った。Fig. 10 は、天井に取り付けられた 48 個の超音波受信器の内、有効な受信器を 4, 6, 9, 24, 48 個にした場合の 3 次元推定値の誤差の変化を示している。横軸は有効な受信器の数、縦軸は誤差を示している。視覚式のモーションキャプチャと試作した超音波式 3 次元タグ装置を用いて計測し、それらの差を計算することによって各座標値のずれの大きさを誤差とした。推定方法は、最小二乗法と LMedS 法を用いている。グラフの 5 本の線は、計測位置を 5 回変化させ、各々の位置において 30 回計測と推定を行い、その平均をとったものである。

Fig. 10 より、各推定法とも、超音波受信器の数が増加すると誤差が減少していくことがわかる。また、LMedS 法による推定では外れ値の影響を受けにくい。最小二乗法では、外れ値の影響があるため数の増加に伴う誤差の減少は緩やかであることが確認できる。

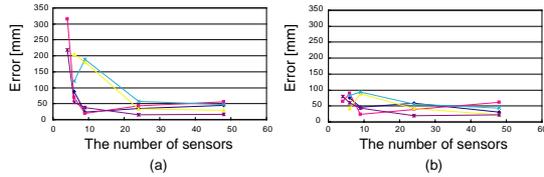


Fig 10: Concern of number of sensor and error: (a) Least squares method, (b) RANSAC (LMedS)

Fig. 11 は、偏差を示している。プロットされた点は、各座標値の偏差の平均値を示している。Fig. 11 は、誤差と同様に、各手法とも、超音波受信器の数が増加すると偏差が減少していくが、LMedS 法による推定の方が偏差が安定しており、高い分解能を維持できることを示している。

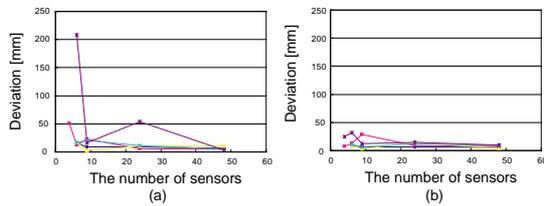


Fig 11: Concern of number of sensor and deviation: (a) Least squares method, (b) RANSAC (LMedS)

4.4.3 部屋サイズでの 3 次元位置推定の誤差評価

評価方法は、 $4.0 \times 4.0 \times 2.7\text{m}$ 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開発した超音波式 3 次元タグ装置で計測した点の差を計算し、各座標値のずれの大きさを誤差とした。超音波センサとして天井に取り付けられた 48 個の超音波受信器を使用し、位置推定法として LMedS 基準の RANSAC を使用した。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。Fig. 12(a) は、実際に計測した 3 次元位置の計測点を示しており、計測点の数は約 1400 点である。Fig. 12 は、1400 点の誤差データをもとにして線形補間し等高線図にしたものである。青色のエリアは誤差が小さく、赤色のエリアは誤差が大きい。黒い四角で囲まれている部分が、天井

に超音波受信器が取り付けられている範囲である。この下では、誤差は、20mm ~ 80mm 程度である。

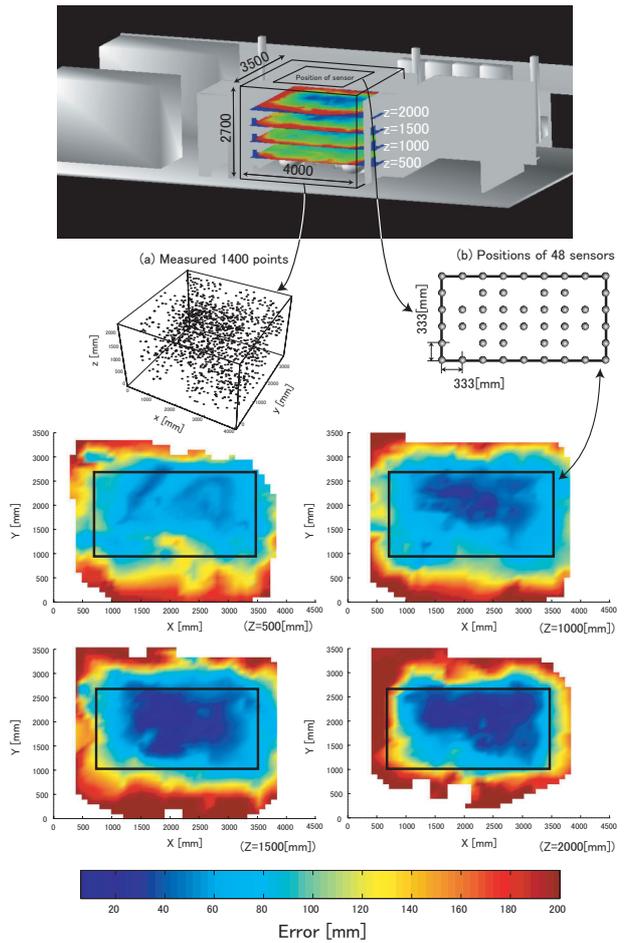


Fig 12: Error estimation of estimated position

4.4.4 手によるオクルージョンの影響評価

本システムを使用する際に、最もよく起こる測定値への外れ値混入は、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。超音波送信器が取り付けられた物体の真上に手をかざすことによって起こる隠れについての性能評価を行った。結果を Fig. 15 に示す。x 軸は、手と物体の距離を表している。y 軸（第一項目軸）は、誤差、偏差を示している。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（値の読み取りは、第二項目軸）は、有効な超音波受信器の数を表している。図は、物体に手が近づくと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、両手法とも手が対象物から離れている際には誤差が少なく（40mm 以下）、分解能も高いが、手が近づくと誤差が大きく、分解能が低くなることわかる。また、LMedS 法では、150mm 程度までは、ばらつきは大きくなるが、大きな誤差は生じていないことがわかる。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。

4.4.5 人が操作した時の対象物の軌跡の測定

複数物体の同時計測機能: Fig.13は、コップを部屋内に置かれている机、椅子、床、棚などに移動した時の、コップの軌跡の様子を示している。左図、右図はそれぞれ1個のコップを動かした時の軌跡、2個のコップを動かした時の軌跡を示している。左図は、サンプリング周波数が50[Hz]で計測されたものであり、部屋の広い範囲にわたってコップの位置が実時間で計測できていることを示している。また、右図では、各々のコップに取り付けられた超音波を時分割発信し、各々25[Hz]サンプリングしており、時分割発信機能によって同時計測が可能であることを示している。同様に、計測すべき対象物の数を増やしていくことが可能である。この場合、各対象物のサンプリング周波数は $50/n$ [Hz](n 個の時)程度になる。

選択的発信による高速サンプリング維持機能: Fig.14では、各対象物のサンプリング周波数を擬似的に高く保つために、人の手に超音波発信器を取り付け、その手の近傍(200mm以内)にある対象物のみを計測した時の様子を示している。図中の赤い球が手の位置を示している。高速サンプリング維持機能に関しては、本稿で述べたように超音波時分割発信させるのではなく、複数の超音波を同時に発信させ、得られた各超音波距離情報を用いて探索問題を解くことでサンプリング周波数を高く保つ手法も考えられる。現在、同時発信に基づく高速サンプリングアルゴリズムを開発している[12]。

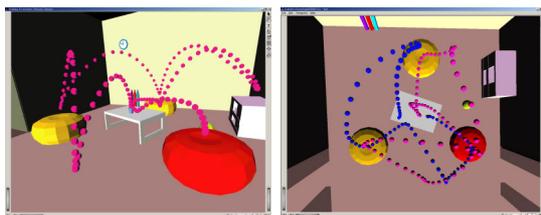


Fig 13: Measured trajectory of cup



Fig 14: 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

本章では、第2で述べた対象物センサ化システムの具体的な構築について述べる。

5.1 対象物センサ化システムの実現手法

日常生活環境中の対象物は、その構造・形状が機能と深く関わっているため、ほとんどの場合、質点を仮定できず、日常生活行動を認識するためには、位置情報のみならず、何らかの形状情報を持つことが必要と

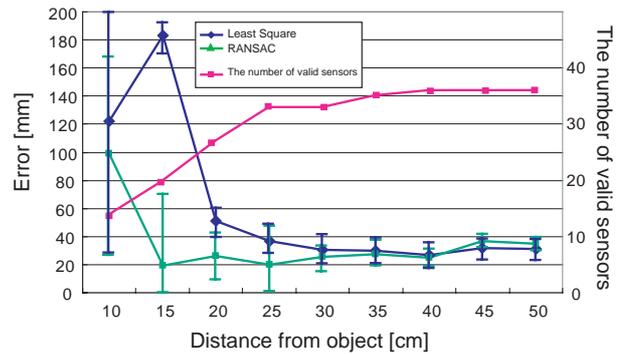


Fig 15: Estimation of estimate of 3D position in occlusion

なる。しかし、日常生活環境中の対象物について詳細な形状データを作成することは不可能ではないにしても極めて手間のかかる作業である。また、計測すべき行動が明らかな場合には、詳細な形状データが不要であることが多い。そこで、本研究では、あらゆる対象物の物理的・形状と機能を抽象化させ、計算機上で単純化された形状を持つ仮想的なセンサに置き換えて記述する表現方法を提案している。本稿での仮想センサとは、物理的なセンサとは関係なく、計算機上でセンサとして仮想的に振舞うことができるものを意味している。

1. 3次元タグによる対象物探索・認識機能: 対象物認識(対象物が何であるか)と対象物探索(対象物がどこにあるか)を3次元タグによって、ハードウェア的に解決する機能。この機能によって、第2章で述べた、対象物位置をベースとした観察を実現する。
2. 簡易形状モデルによる物理特徴の抽象化機能: 対象とする物理現象をモデル化するために、対象物の特徴的な形状を簡易形状を用いて定義することで対象物の物理構造を抽象化する機能。この機能と次に述べる仮想センサによる対象物の機能のモデル化機能を用いて、第2章で述べた、対象物の属性・機能をベースとした解釈機能を実現する。
3. 仮想センサによる対象物の機能のモデル化機能: 抽象化された対象物形状や構造に対して、あらかじめ用意された仮想センサを選択して取り付けることで、対象物の物理的な作用をモデル化する機能。
4. 対象物センサによる行動認識機能: 対象物の性質を維持しつつ、頑健に認識する対象物センサを作成する機能であり、対象物の機能モデルと3次元タグを統合して、人が対象物の機能を利用している際の、個々の対象物の状態変化や、対象物相互の状態変化を実時間で検出し、随伴行動を認識する機能

5.2 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.16に示す。

1. 物理的センサ層: 超音波式3次元タグシステム: 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: 対象物の機能をモデル化する層で、ビ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、および、仮想センサ・

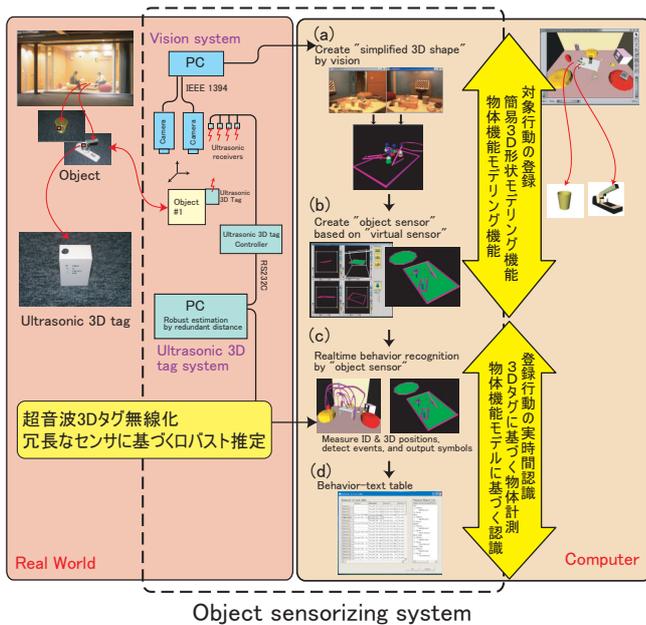


Fig 16: Configuration of object sensoring system constructed using ultrasonic 3D tag and stereo vision

効果器を処理するための基本メソッドからなる。ステレオビジョン (Pointgrey 社 1394 カメラ Dragonfly) 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 (図中 (a))。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、対象物の機能を簡単にモデル化可能である (図中 (b))。基本的な仮想センサとして、複数の3次元タグから姿勢や、リンクの角度を検出するセンサ、仮想センサ・効果器間の接触を検出するための接触センサが用意されており、たとえば、長方形の机であれば、長方形の仮想センサとして定義でき、コップは、これに作用する仮想効果器として定義可能である。実際に対象物の機能モデルを使用する場合、3次元タグの精度によっては、状態検出が不安定になるが、効果器を大きさを変更することで、安定した状態検出が可能である。

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式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。定義された対象物の機能モデルを用いて、仮想センサ層の基本メソッドを用いて行われる角度や、接触状態の変化の検出を基に、対象物固有の行動を定義しておくことで、行動をシンボルとして出力可能である。

5.3 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. 17は、構築した対象物センサ化システムを用いてセンサ化された、部屋におかれた複数の対象物の位置を計測したときの物体の軌跡を示している。また、下に示す出力結果は、その時の、対象物センサ化システムシステムの出力結果である。Fig. 17より、超音波式3次元タグで用いている位置推定アルゴリズムに

よって、測定中に生じる手による隠れや反射の影響が軽減され、対象物の動きを確実に計測できていること、また、出力結果からは、日常生活空間で行なわれる行動認識が頑健に行なえていることが確認できる。

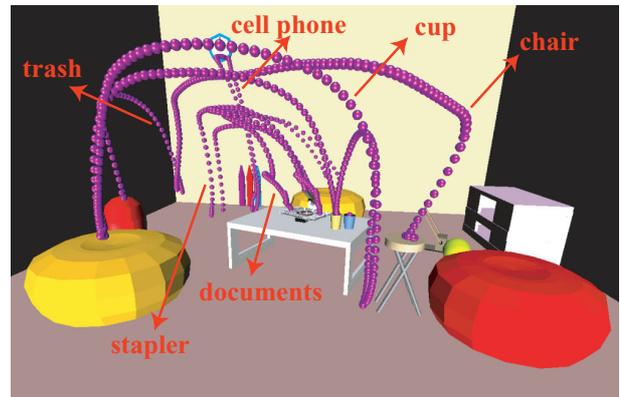


Fig 17: Recognition of daily human activity based on object shaped sensors

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,...

5.4 対象物センサ化システムの Behavior-to-speech への応用

人の日常行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で、人間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に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いう観点から、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、後天性の視覚障害者への学習支援 [13] や、実体と実行動による語学学習支援などの新しい応用が考えられる。

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、認識する方法として、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する対象物センサ化を述べた。対象物センサ化は、行動認識の問題を、対象物認識の問題から分離し、対象物の認識については、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、対象物に位置測

定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・位置推定問題を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。

また、本稿では、このようなアプローチを可能とするシステムとして、筆者らが開発してきた超音波式3次元タグについて述べ、超音波式3次元タグが安価であるという利点を生かし、冗長な超音波センサからの距離情報を利用した高精度でロバストな3次元位置推定法を確立することを目的に、最小2乗法による推定手法とLMedS法による推定手法を開発システムに適用し比較した。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。この位置推定法を用いて行った評価実験において、位置計測性能評価では、超音波受信器の数が増加させることで、誤差を減少させ、分解能を高くすることができた。推定位置の誤差評価では、天井に取りつけられた超音波受信器の下付近では、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、オクルージョン発生時には、手による反射に起因した外れ値の影響が大きくなるが、LMedS法を用いたロバスト推定を適用することによって、オクルージョンの影響を小さくできることを確認した。

さらに、本稿では、開発した超音波式3次元タグと、ステレオビジョンを統合して構築した対象物センサ化システムを述べた。構築した対象物センサ化システムは、物理的なセンサ層である超音波式3次元タグ、対象物の物理的特徴を抽象化させ、所望の状態を検出するための仮想センサ層、仮想センサ群の出力を用いて行動を認識し、これを出力する対象物センサ層からなる。構築してシステムでは、カメラのステレオ視を用いて、ステレオ画像における対応点をマウスにより対話的に指定していくことで、対象物の重要な性質である3次元形状を簡易な形状にモデル化を行うことが可能であり、こうして作られた3次元形状に、あらかじめ用意された仮想センサ・効果器を対話的に取り付けていくことで、対象物の機能をモデル化することが可能である。日常空間型の検証システムを用いた日常行動の認識実験によって、提案手法の有効性を確認した。

今後の課題として、1) 対象物の性質を維持するためにハードを小型化すること、2) 環境中に取りつけられた視覚情報等を対象物指向的に(対象物の位置と固有の属性をベースとして)情報統合することにより、計測できる対象物の状態量を増やし(e.g., ペットボトルのキャップが外れているなど)、認識できる日常活動の対象を増やすこと、3) どのような仮想センサを用意したらよいかという仮想センサの体系化、4) 確率論的な視点を持ち込むなどによって、より長期にわたる行動認識手法の開発、などがあげられる。

参考文献

- [1] 独立行政法人 産業技術総合研究所編, “デジタル・サイバー・リアル —人間中心の情報技術—,” 丸善, 2002
- [2] 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
- [3] <http://www.cc.gatech.edu/fce/ahri/>

- [4] <http://mediacup.teco.edu>
- [5] P.H. Dietz, Darren Leigh, William S. Yerazunis: Wireless Liquid Level Sensing for Restaurant Applications, IEEE International Conference on Sensors, 62.6, 2002
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 西田, 相澤, 堀, 柿倉: 超音波センサを用いた対象物のセンサ化に基づく人の日常活動の認識, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集, 1A1-J07, 2002
- [9] 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
- [10] 西田, 相澤, 北村, 堀, 柿倉: 超音波式3次元タグを用いた対象物の機能モデルに基づく人の日常活動の頑健な認識, (社)計測自動制御学会 第3回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2002), Vol. 3, pp. 183-184, 2002
- [11] 西田, 北村, 堀, 溝口: 超音波式3次元タグとステレオ視とを用いた対象物機能モデル化による人間行動の認識, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 2003 (in press)
- [12] 西田, 秋山, 堀, 柿倉: 超音波3次元位置計測のための冗長なセンサデータを用いた高速位置推定アルゴリズム 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集, 2003 (in press)
- [13] 西村, 西田, 蔵田, 大隈, 興梠, 加藤, 中村, 堀, 中島, 坂上: バリアフリー情報支援のためのウェアラブル・ユビキタス協調システムの実現にむけて, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU2002, Vol. 102, No.554, pp55-60, 2003
- [14] M.A. Fishler, R. C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Application to Image Analysis and Automated Cartography, Communication of the ACM, ACM, Vol24, pp. 381 - 395 (1981)