

# 超音波を用いた介護支援ロボットの安全対策

中島 弘道 (理研) 向井 利春 (理研)

Safety precautions for nursing-care robot using ultrasonic waves

Hiromichi NAKASHIMA (RIKEN), and Toshiharu MUKAI (RIKEN)

Abstract: We developed a nursing-support robot that can lift a patient. Since many parts of the robot come in contact with the patient during the lifting operation, safety is considered the highest priority. Therefore, we propose a technique for detecting the breakdown of the potentiometers by monitoring the movement of the robot using ultrasonic waves.

## 1. はじめに

高齢化社会の進行に伴い、将来の介護者不足が大きな社会問題となっている。介護作業は介護者の肉体的、精神的負担が大きいことから、介護・福祉分野のサービスロボット開発は以前から行われている。その具体例として、手の不自由な高齢者・障害者の食事の自立を支援するロボット<sup>[1]</sup>や、人と触れあい、人に楽しさや安らぎを提供するメンタルコミットロボット<sup>[2]</sup>、インテリジェント車椅子<sup>[3]</sup>などがある。また、人体に装着してパワーをアシストすることによって、介護者や要介護者の動作を助けるロボットスーツ<sup>[4]</sup>も提案されている。

介護者の肉体的負担が最も大きいもののひとつに、移乗介助がある。これは、ベッド-車椅子間や、ベッド-浴槽間など自力で移動ができない被介護者を移動させる作業である。移乗作業を行う為の装置は既にいくつか商品化されており、スライディングボードや移乗リフト等がある。しかし、使用に時間がかかる、手間がかかる等の理由から、これらの装置は日本ではあまり普及していないのが現状である。この作業は、寝たきりの被介護者には欠かせないものであるが、介護者への負担が非常に大きいことから、より実用的なロボット等による代替が期待される。

移乗を行うロボットには、日本ロジックマシンのユリナ<sup>[5]</sup>、工業技術院機械技術研究所で研究されたメルコング<sup>[6]</sup>、パナソニックのトランスファアシストロボット<sup>[7]</sup>、ダイヘンのC-Pam<sup>[8]</sup>などがある。これらのロボットは、自由度が低く動作が限定されている為、汎用性が低くベッド以外の任意の対象に対する抱き上げや、降ろす動作というような柔軟性を持たせることが困難であると考えられる。そこで、我々は多自由度の腕を持ち人間のように多様な抱き上げ動作が可能な介護支援ロボットを制作した(Fig.1)<sup>[9]</sup>。このロボットはその腕を用いて、実際の人間をベッド-車椅子間での移乗が可能である。また、自由度が高い為に汎用性があり、病院や介護施設などで人間と接して力の授受を伴うような様々な作業を行うことができる。

このような介護ロボットは産業用ロボットとは異なり、人の近くで人と接して動作するため、その安全性が非常に重要である。したがって、このロボットには様々な安全対策を行っている<sup>[10]</sup>。いくつか具体例をあげると、衝突時のショック軽減の為に、全身をやわらかい素材で制作しており、さらに、関節部分はギヤ等の可動部分に指や髪の毛を巻き込まないように弾性体で覆っている。また、ソフトウェアは、常に各種センサ値を監視しており、異常値を検出した場合には即座に動作を停止するように設計されている。

このように、安全性を高める為に様々な対策を行っているが、未だいくつかの安全性の問題がある。その一つに、ポテンショメータの故障検出問題がある。現在、ロボットの関節角度の検出にはポテンショメータが使用されているが、ポテンショメータは故障検出が困難である。2重化を行うことで、安全性を高めることは可能であるが、現在の構造上内部で2重化することが難しい。よって本研究では、台車に取り付けた超音波センサと手首付近に取り付けた超音波送信機を用いて、両者の位置関係を推定することでポテンショメータの異常を検出する。実験では、ロボットの実際の抱き上げ動作を行い、本システムの有効性を確認した。よって、このシステムを用いることにより、角度センサの動作異常を検出することが可能となると考えられる。

## 2. 介護ロボット

本ロボットは介護支援を目的とする研究の為に制作され、実際の人に対してベッドと車椅子の間を移乗させることが可能である。基本スペックをTable.1に示す。ロボットは1台のメインPC(CPU: Intel Dore2Duo, 2GHz)と20枚以上の小型コントローラ(CPU: Microchip dsPIC33F)で構成されており、それぞれをネットワーク(CUNet)で接続し分散情報処理を行っている。

このロボットによる移乗作業を行う場合、被介護者が必ずロボットのそばにいて、その操作を行う。これは、ロボッ



Fig. 1: Nursing-care robot.

Table 1: Basic specifications of the robot

Height	1,400mm	
Weight	180kg ( inc. batteries)	
Payload	63kg (tested value)	
D.O.F.	Head	3
	Arm	7 each
	Waist	2
	Cart	3 (with 4 motored wheels)
Sensors	Vision	2 cameras
	Audition	2 microphones
	Tactile	428 points
Operation time	2 hour in standard use	
Actuator type	DC motor	
Power	NiMH batteries	
Base movement	Omni-directional	

トがそのセンサ情報から自ら判断し動作を行うことは、このような失敗が許されない作業においては、現在の情報処理技術では危険であるためである。

操作者がロボットへ指示を伝える方法として、我々は触ることによって操作者の意思を伝える触覚ガイダンスという手法を開発した<sup>[9]</sup>。ロボットの上腕および前腕に装着された触覚センサを介して操作者がロボットに指示を伝えることによって、腕を差し込む位置の微調整や、抱き上げ動作の進み具合等をコントロールすることが可能である。

### 3. 超音波音源位置検出システム

超音波による位置検出において、超音波生成、時間差検出、位置推定の3つの処理を行っている。具体的な処理の流れは、ロボットの左右の手首位置に設置した超音波送信モジュールから超音波を出力し、その超音波信号の到達時間差 TDOA (Time Difference of Arrival) を4つの超音波センサで検出し、その時間差情報から3次元位置の推定を行う。以下でこれら3つの処理それぞれの詳細を説明する。

#### 3.1 超音波送出

Fig.2の写真に示すような周波数40kHzの超音波信号を発生するモジュールを作成した。本モジュールは、超音波を発生させる回路とロボット内のネットワークと通信し超

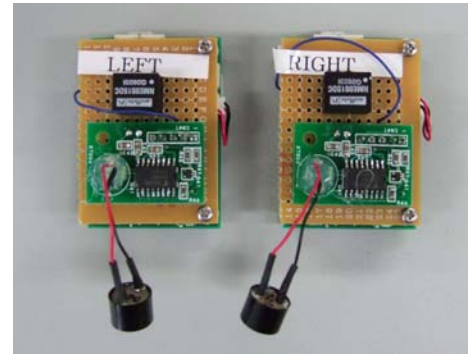
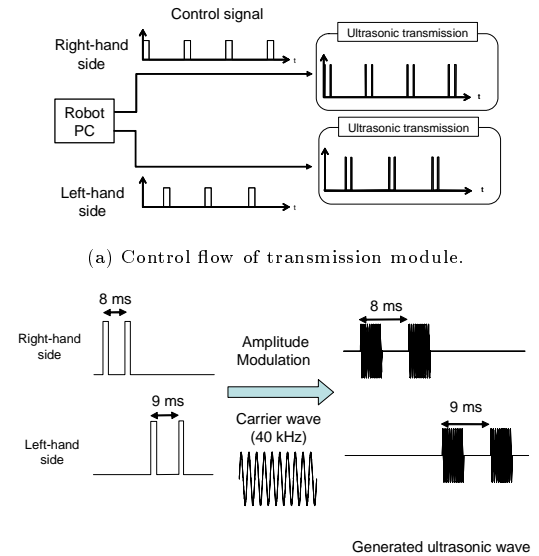


Fig. 2: Transmission module.



(a) Control flow of transmission module.

(b) Ultrasonic wave shape.

Fig. 3: Transmission module behavior.

音波の発生タイミングを制御する小型コントローラで構成されており、ロボットの左右の手首に取り付ける為に2つ使用する。Fig.3(a)に示すように、このモジュールはロボットのメインPCからネットワークを介して合図を受信すると、2つのパルス状の超音波信号を出力する。Fig.3(b)に示すように、2つのパルスは40kHzの超音波によって変調されており、パルスの時間間隔を左右のモジュールで異なるようにすることによって、受信側で左右どちらのモジュールからの超音波信号であるかを識別することを可能としている。さらに、2つのパルスのパルス間距離を利用し設定したパルス間距離以外の信号を除去することによってノイズや反射等による誤認識を減らすことが可能である。

#### 3.2 時間差検出

超音波送信モジュールから送出された信号を超音波センサで受信し、到達時間差を獲得するまでの処理の流れをFig.4に示す。処理は大きく2つからなり、超音波信号を小型コントローラへ入力可能な波形に変換するための前処理部分と、AD変換されたデジタル信号を処理し、到達時

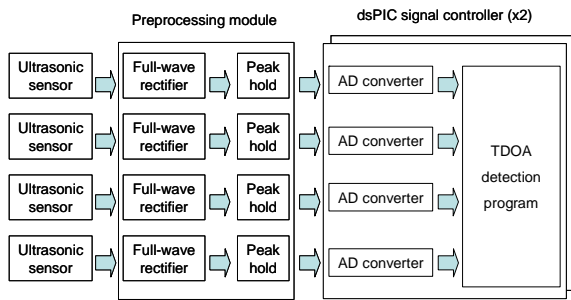
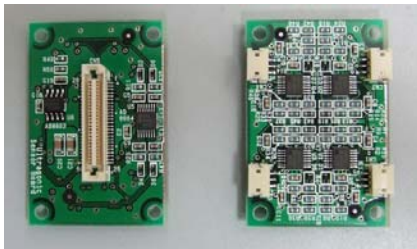
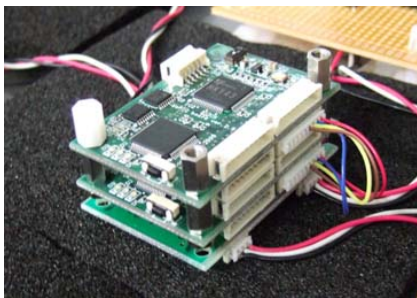


Fig. 4: Flow of ultrasonic wave processing.



(a) Preprocessing circuit.

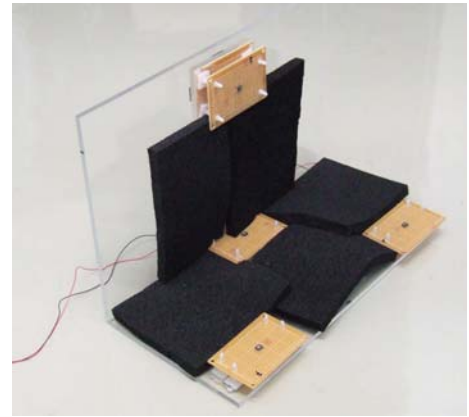


(b) Three stacked modules.

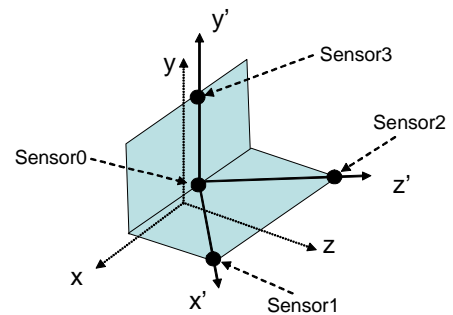
Fig. 5: TDOA detection module.

間差を求める部分からなる．前処理では，4つの超音波センサからの信号を全波整流及びピークホールドすることによって，40kHzの超音波波形による変調前の波形に復調させる．この復調された信号は小型コントローラに内蔵されたAD変換器へ入力される．小型コントローラでは，送信された信号に含まれている2つのパルスの立ち上がりを検出し，パルス間距離の判定が正しかった場合にのみ各TDOAを計測してその値をネットワークを介してメインPCに送信する．

Fig.5(a)に制作した前処理部分のモジュールを示す．超音波センサと接続する4つのコネクタと，小型コントローラとスタックするためのコネクタを備えている．小型コントローラは，左右それぞれからの信号を処理するために，2枚使用する．Fig.5(b)は，前処理モジュールと小型コントローラ2枚を組み合わせたものである．小型コントローラのAD変換器によるサンプリング周波数は高速であるほど，最終的な定位精度が高くなると考えられるので，出来るだけ高くしたい．そこで，今回使用する小型コントローラで実時間処理が可能である限界のサンプリング周波数144kHzを今回は使用した．



(a) Photograph of device.



(b) Arrangement and coordinates of ultrasonic sensors.

Fig. 6: Ultrasonic sensor device.

### 3.3 位置検出

4つの超音波センサを搭載した，超音波位置検出装置を作成した (Fig.6(a))．図6(a)の写真中の黒い部分はスポンジである．このスポンジがない場合に，反射波の影響と思われる波形の乱れが観測された (図7)．図中の上のグラフは，障害物がほぼない場所に超音波センサを設置した場合の前処理モジュールからの出力波形であり，真ん中の図が，スポンジのない装置上の超音波センサを用いた場合の出力波形である．図からわかるように，波形がかなり乱れている．そこで，反射波による影響を減らす為に，板の上にスポンジを貼りつけた．その結果，下の図のように反射による影響が低減された．

超音波センサの配置及び，センサボード上の座標  $(x', y', z')$ ，ロボット座標  $(x, y, z)$  を Fig.6(b) に示す．センサは3次元直交座標の原点に1つと，原点から15cmの距離の3つの直交座標軸上  $(x', y', z')$  にそれぞれ配置した．センサ0と他のセンサとの距離を  $d$ ，超音波音源の位置  $(x', y', z')$  からセンサ0～センサ3までの距離をそれぞれ  $l_0, l_1, l_2, l_3$  とすると，

$$\begin{cases} l_0 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} \\ l_1 = \sqrt{(x' - d)^2 + y'^2 + z'^2} \\ l_2 = \sqrt{x'^2 + (y' - d)^2 + z'^2} \\ l_3 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' - d)^2} \end{cases} \quad (1)$$

となる．

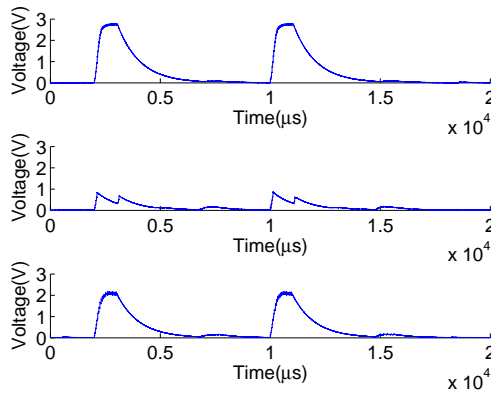


Fig. 7: Influence by reflection.

よって、センサ0と他のセンサ間の超音波の到達時間差  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  は、音速を  $c$  とすると

$$\begin{cases} \Delta t_1 = (l_1 - l_0)/c \\ \Delta t_2 = (l_2 - l_0)/c \\ \Delta t_3 = (l_3 - l_0)/c \end{cases} \quad (2)$$

となる。

センサで計測される時間差情報  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  から超音波音源の位置  $(x', y', z')$  を求める為には式 (1),(2) を解く必要があるが、解析的に解くことは困難である為、繰り返し計算による数値解を使用する。

今回使用するサンプリング周波数は 144kHz であり、センサ間距離が 15cm であることから、音速を 340m/s とすると計測される時間差は、 $0.15 * 144000/340 \approx 63.5$  から  $\pm 64$  サンプルとなる。超音波センサの指向性から、 $\pm 60$  サンプルの範囲で超音波の検出が可能であることから、各軸に対して  $121^3$  個のテーブルを用意した。繰り返し計算から得られた数値解をこれらのテーブルに代入することによって、計測された3つの時間差から音源位置を即座に得ることが出来る。

センサボードをロボット座標に対して平行移動させた位置に設置するとすると、センサボード上の座標軸  $(x', y', z')$  からロボット座標  $(x, y, z)$  への変換は、ロボット座標からみたセンサボードの原点座標を  $(o_x, o_y, o_z)$  とすると、以下の式によって求められる。

$$\begin{cases} x = x'/\sqrt{2} - z'/\sqrt{2} + o_x \\ y = y' + o_y \\ z = x'/\sqrt{2} + z'/\sqrt{2} + o_z \end{cases} \quad (3)$$

### 3.4 検出精度

検出精度を検証するために、複数の位置において送信機を固定して検出された時間差を測定した。音源を提示する範囲は、 $(o_x, o_y, o_z) = (0, 0, 0)$  において、 $-30cm < x < 30cm, 30cm < y < 50cm, 10cm < z < 40cm$  とした。

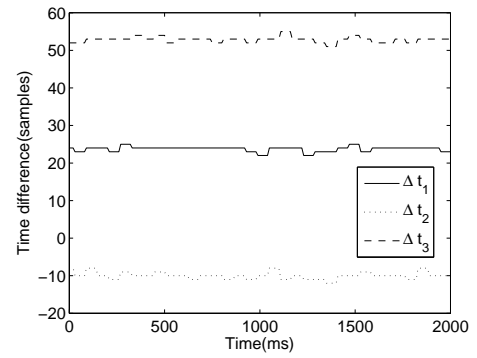


Fig. 8: Detection accuracy.

測定結果の一例を Fig.8 に示す。超音波の発生源が固定されている為、検出される時間差も一定の値となるはずであるが、実際にはこの図の場合、最大で4サンプル分変動している。実験結果から、本検出装置の標準偏差は1.5サンプル程度あることがわかった。

サンプリング周波数が 144kHz の場合、1 サンプルは 2.36mm である。センサボードにおいて計測される時間差は離散値であることから、音源提示範囲において、それぞれ1 サンプルの誤差が生じた場合の3次元位置座標での誤差の最大値を計算により求めると、 $\Delta x = 10.1cm, \Delta y = 14.8cm, \Delta z = 2.8cm$  となりかなり大きな値となる。

このような結果が生じる原因は、式 (1),(2) から得られる時間差  $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$  を超音波音源の位置  $(x', y', z')$  に変換する変換式が、ある特定の場所で時間差に対して非常に敏感に変化するためである。サンプリング周波数を高くし、時間差の検出精度を上げれば誤差を減らすことが可能であるが、今回使用している小型コントローラの性能上、サンプリング周波数をこれ以上高くすることは不可能である。このことから、3次元位置空間上で計測データの比較を行うと誤差が非常におおきくなり、トラブル検出には不向きであると考えられる。

時間差空間における検出精度に比べて、ロボットのポテンショメータによる関節角の精度は高い。精度の低いものを座標変換等により変換した場合、誤差が増大する危険性があるが、精度が高いもの場合には誤差の増大は低く抑えることが出来る。よって、ポテンショ値から計算される送信機の座標から式 (1),(2) を用いて、超音波センサボード上の到達時間差に変換し、超音波センサボード上で計測された到達時間差と比較することで、精度の高い比較が行えると考えられる。

## 4. 動作確認実験

実際のロボットに抱き上げ動作を行わせ、制作した超音波位置推定システムの実験を行った。

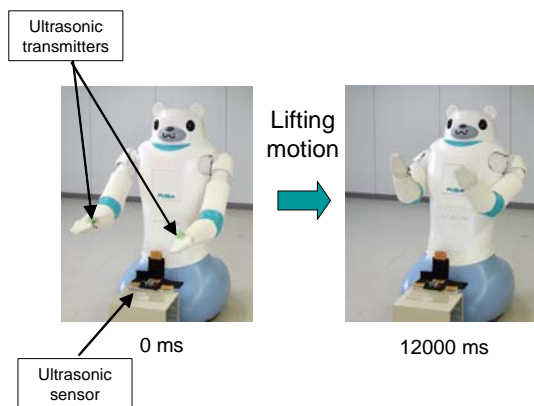


Fig. 9: RIBA motion for experiment.

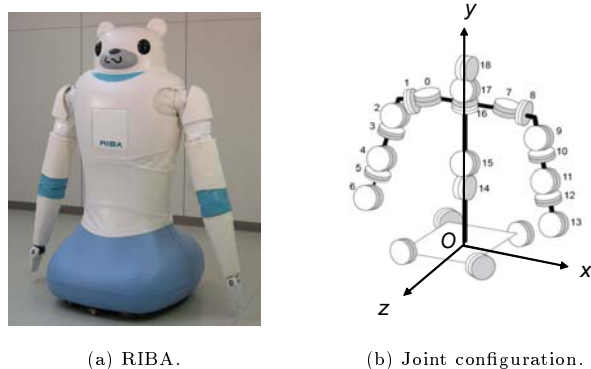


Fig. 10: Positions of RIBA's joints.

#### 4.1 実験環境

Fig.9 に示すように、ロボットの両手首の位置に超音波送信モジュールを取り付け、受信ボードをセンサセットの原点がロボット座標の ( $o_x = 0mm, o_y = 350mm, o_z = 240mm$ ) となる台車上部に設置した。ロボットに 12000ms の抱き上げ動作を行わせ、その間の各関節角度及び超音波の到達時間差データを、サンプリング周期 10ms の時間間隔で収集した。ロボットは Fig.10 に示すように、19 の関節を持つ。それぞれの関節角はポテンシオメータにより計測される。超音波送信機を取り付けた手首座標は、左右それぞれ 8 つの関節角からキネマティクス計算によって得られる。

#### 4.2 実験結果と考察

3次元位置空間において比較した実験結果を Fig.11 に示す。図中の実線が、ポテンシオメータで測定された関節角からキネマティクスによって計算された手首座標、破線が超音波による到達時間差から計算された超音波源の座標である。3.4 において検討したように、大雑把には一致しているが、誤差がかなり大きいことが分る。特に y 座標の誤差が大きく、 $\pm 15cm$  程度もある結果となり、検討した通りとなった。

次に、時間差空間において比較した結果を Fig.12 に示す。図から、3次元位置空間における比較に比べてかなり

よく一致していることがわかる。3.4 における実験から、超音波センサにより計測された到達時間差の標準偏差は 1.5 サンプル程度である。それに対して、手首座標から変換された到達時間差の標準偏差は、Fig.12 からそれよりもかなり小さいことがわかる。このことから、2つのデータの差はおおよそ  $\pm 1.5$  サンプル以内となると考えられる。

しかし、Fig.12 ではそれよりも大きく異なっている部分が存在する。この原因として考えられることは、現在のロボットのゼロ点が正確に正しくないこと及び、ポテンシオメータのスケールの調整も十分でないことが挙げられる。これらの調整を十分に行えば、この問題は解決すると思われる。

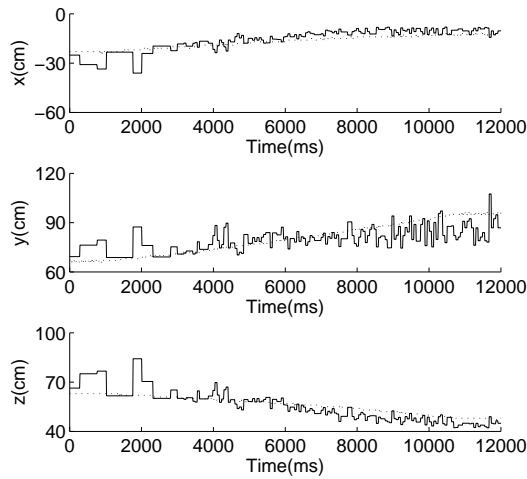
これらの結果から、時間差空間においてセンサデータの比較を行うことにより、ロボットの異常動作を検出し、安全性の向上に役立てることが可能であると考えられる。

### 5. まとめ

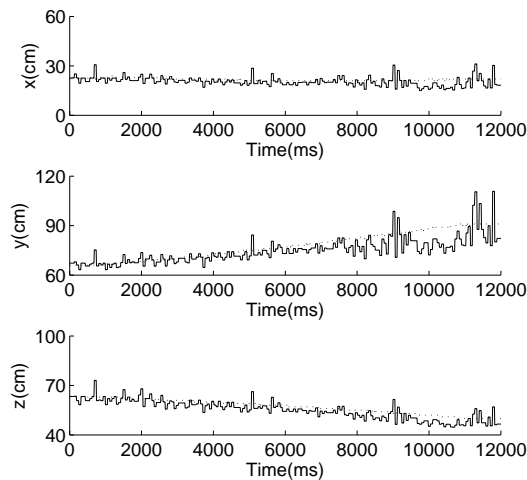
介護支援ロボットの安全性を向上させる為の、超音波を用いた異常動作検出手法を提案した。実験では、ロボットの実際の抱き上げ動作を行い、本システムの有効性を確認した。このシステムを用いることにより、ロボットの両腕の動作異常を検出することが可能となる。

今後、これらのシステムをロボット本体に固定し、異常検出の為のパラメータを検討し、動作プログラムに組み込んでいきたいと考えている。

- [1] S. Ishii, "Meal-assistance robot 'My Spoon'," *J. the Robotics Society of Japan*, vol. 21, no. 4, pp. 378–381, 2003 (in Japanese).
- [2] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, and K. Tanie, "Psychological and Social Effects in Long-Term Experiment of Robot Assisted Activity to Elderly People at a Health Service Facility for the Aged," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.3068–3073, 2004.
- [3] C. Mandel, T. Lüth, T. Laue, T. Röfer, A. Gräser, and B. Krieg-Brückner, "Navigating a Smart Wheelchair with a Brain-Computer Interface Interpreting Steady-State Visual Evoked Potentials," in *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.1118–1125, 2009.
- [4] T. Hayashi, H. Kawamoto, and Y. Sankai, "Control Method of Robot Suit HAL Working as Operator's Muscle Using Biological and Dynamical Information," in *Proc. IEEE/RSJ International Con-*



(a) Wrist position (right).



(b) Wrist position (left).

Fig. 11: Comparative result in three-dimensional space. The solid line is the ultrasonic source position calculated from the TDOAs of the ultrasonic wave, and the short dashed line is the wrist position calculated by the potentiometer from the joint angle measurements using kinematics.

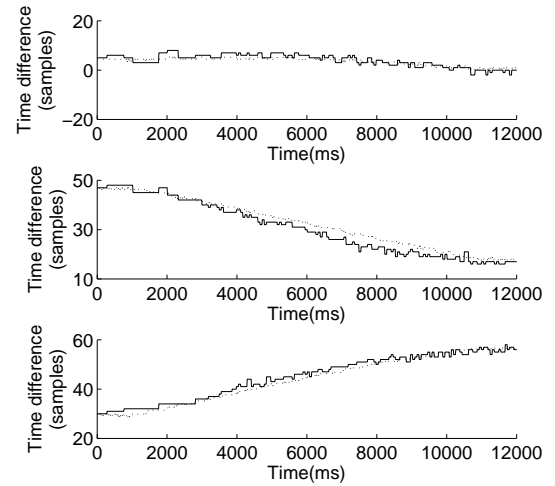
*ference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.3455–3460, 2005.

[5] <http://j-logicmachine.jp/>

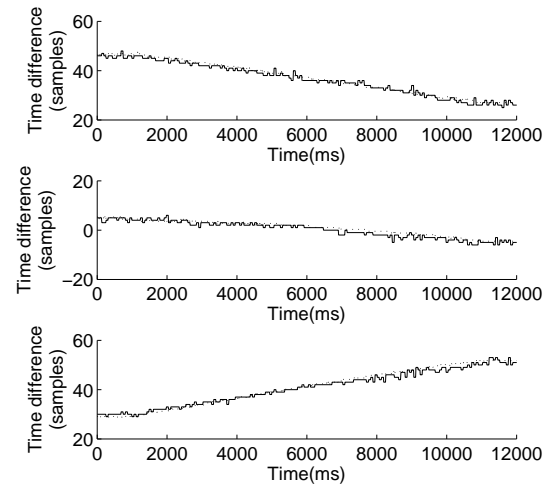
[6] S. Hashino, T. Iwaki, C. T. Wang, and E. Nakano, “Control of Patient Care Robot ‘MELKONG’,” *J. Society of Biomechanisms Japan*, Vol.10, pp.259–269, 1990 (in Japanese).

[7] Y. Kume and H. Kawakami, “Development of Power-Motion Assist Technology for Transfer Assist Robot,” *Matsushita Technical Journal*, Vol.54, No.2, pp.50–52, 2008 (in Japanese).

[8] H. Wang and F. Kasagami, “A Patient Transfer Ap-



(a) TDOA (right).



(b) TDOA (left).

Fig. 12: Comparative result in TDOA space. The solid line is the measured TDOA, and the short dashed line is the TDOA calculated by the potentiometer from the joint angle measurements using expressions (1), (2) and (3).

paratus Between Bed and Stretcher,” *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part B (Cybernetics)*, Vol.38, No.1, pp.60–67, 2008.

[9] 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”, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, (2010), pp.5996-6001.

[10] T. Mukai, S. Hirano, H. Nakashima, Y. Sakaida, and S.Guo, “Realization and Safety Measures of Patient Transfer by Nursing-Care Assistant Robot RIBA with Tactile Sensors,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.23, No.3 (2011) , pp.360-369.