

# 介護支援ロボット RIBA における面状触覚センサを用いた被介護者の姿勢推定

○舟洞 佑記 (理研), 鈴木 達也 (名古屋大), 向井 利春 (理研), 細江 繁幸 (理研)

## Posture Estimation of Patients using Tactile Sensors for Care Assistant Robot RIBA

○Yuki FUNABORA (RIKEN), Tatsuya SUZUKI (Nagoya University),  
Toshiharu MUKAI (RIKEN), and Shigeyuki HOSOE (RIKEN)

Abstract: We propose posture estimation of transferring care-receiver for RIBA. In order to realize more safe and comfortable transfer, it is desired to control arm trajectories fitting to states of care-receivers. For the first step, we estimate the waist position and angle based on tactile sensors. Experiments show the possibility to use the estimated waist positions and angle for real-time arm control.

### 1. 緒言

介護者への負担が大きい移乗介助の支援を主目的に開発された RIBA<sup>[1]</sup>は、横抱きにより被介護者を移乗する(図 1)。移乗時のロボットの両腕の軌道は、対象となる被介護者に対して事前に最適化した軌道である。人間の身体・精神状態は変化するため、用意された軌道が常に安全かつ快適な移乗を実現するとは限らない。操作者による手動調整や初期の接触状態を維持する軌道の生成<sup>[2]</sup>はできるものの、安全性と快適性の更なる向上には、被介護者の姿勢や力の入れ具合などの身体的情報や、被介護者が感じる抱き心地などの精神的情報に応じて両腕の軌道を逐次修正することが望ましい。

取得すべき被介護者の情報は多様に考えられるが、移乗中の落下防止や被介護者にとって楽な状態での移乗には、抱き上げ時・抱き下ろし時・抱き上げ状態における被介護者の姿勢情報が重要となる。その中でも、被介護者の腰位置と腰角度を適切に制御することにより安全かつ快適な移乗が実現できると我々は考える。一方、被介護者の腰位置・腰角度は、ロボットのセンサから直接観測することが難しい。そこで、被介護者の腰位置・腰角度を制御時間内に推定する必要がある。

人間との接触を前提に開発された RIBA には、両腕に面状触覚センサ<sup>[3]</sup>が搭載されており、被介護者との大まかな接触位置と圧力が計測できる。姿勢推定に一般的に用いられるカメラと比較し、遮蔽や視野角による制約が存在しないため、被介護者との距離が近くて視野角が十分得られない移乗時に有用と考えられる。一方、人間と接触するロボットの研究は少なく、触覚情報に基づく姿勢推定手法は十分に研究されていない。本稿では、人間と直接接触して移乗介助を行う RIBA において、両腕に搭載された面状触覚センサの情報から、被介護者の腰位置・腰角度を推定する。推定結果に基づき制御することを想定するため、まずは単純な推定手



Fig.1 RIBA lifting a patient by cradle hold

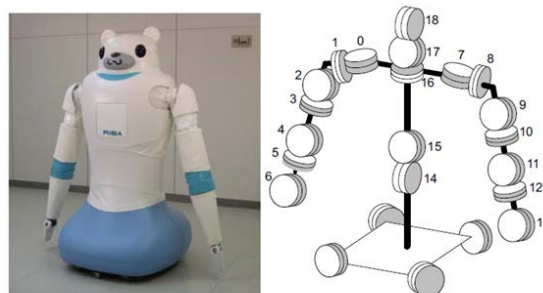


Fig.2 RIBA and its joint configuration

法を提案し、実時間で推定可能かを検証する。

### 2. 介護支援ロボット RIBA

本章では、介護支援ロボット RIBA の構成を説明する。RIBA は介護の中でも力作業を支援するために開発された試作ロボットであり、63kg までの健常者において、ベッド-車いす間の移乗に成功している<sup>[1]</sup>。

RIBA の関節軸構成を図 2 に示す。RIBA は台車部を除き 19 関節を持ち、それぞれエンコーダにより実際の関節角を取得できる。RIBA の腕部には、図 3 の面状触覚センサが配置されている。面状触覚センサは半導体圧力センサを 2 次元に配置して弾性体カバーで覆った構成である。上腕の内側と外側にそれぞれ  $8 \times 8 = 64$  の素子を持つ触覚センサがある。前腕では、複雑な形状に合わせるために素子数を減らしており、内側 47 素子、外側 48 素子となっている。これら 8 つが RIBA の主な触覚センサとなる。これらセンサでは、指で軽く触つ

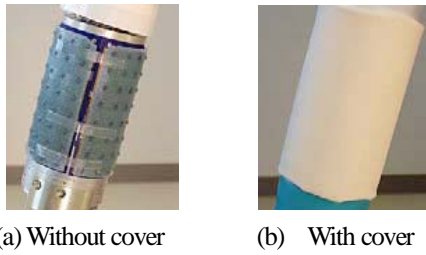


Fig.3 Tactile sensors on the upper arm

た力から人間が面上に乗る力まで検出できる。

RIBA のホスト PC は 1msec 単位のマルチメディアタイマを用いて時刻の管理を行っており、約 10msec の周期でセンサ値の取得や軌道計算などの処理を行う。なお、1 周期で 1 枚の触覚センサ値を取得する。実時間で被介護者の腰位置・腰角度を制御するには、最大でも 10msec 以内に腰位置・腰角度を推定する必要がある。

### 3. 提案手法

触覚センサの出力分布から、抱き上げ時の被介護者の腰位置と腰角度を推定する手法を提案する。被介護者の上半身と下半身を剛体と仮定すると、被介護者の背中と上腿の接触面が解れば被介護者の腰位置と腰角度が求まる (図 4(a)(b))。そこで、RIBA に搭載された 8 枚の触覚センサの出力分布から背中と上腿の接触面を求め、接触面の交点から腰位置・腰角度を推定する。

#### 3.1 背中と上腿の接触点計算

触覚センサの出力分布を 2 次元平面と捉えたと、一般的な画像処理の手法が適用できる。各素子の反応の有無が二値画像に相当するため、ラベリング<sup>[4]</sup>により同一の接触領域が抽出できる。8 近傍で連結し、2 次元のセンサ座標上で同一領域  $A$  が得られたとする。  $A$  内のある座標  $\mathbf{u}$  での圧力値を  $p(\mathbf{u})$  とし、  $A$  の仮想的な接触中心  $\mathbf{u}_{cop}$  を、式(1)の重心計算で求める。

$$\mathbf{u}_{cop} = \frac{1}{S} \sum_{\mathbf{u} \in A} p(\mathbf{u}) \mathbf{u} \quad \cdots (1)$$

ここで、  $S = \sum_{\mathbf{u} \in A} p(\mathbf{u})$  であり、領域  $A$  内の全素子の圧力の総和を示す。実際には RIBA の腕表面は平面ではないため正確な重心位置は求まらないが、計算量の観点から本稿では  $\mathbf{u}_{cop}$  を  $A$  の接触中心とする。

次に、分割された領域ごとに得られる接触中心から、背中と上腿の接触のみを抽出して接触点とする。ロボットは制御周期ごとに実際の関節角ベクトル  $\mathbf{q}$  をエンコーダで計測する。計測した  $\mathbf{q}$  を用いて順運動学を計算することで、センサ座標上の接触中心  $\mathbf{u}_{cop}$  をワールド座標上の接触位置  $\mathbf{x}_{cop}$  に変換する。

$$\mathbf{x}_{cop} = T(\mathbf{q}; \mathbf{u}_{cop}) \quad \cdots (2)$$

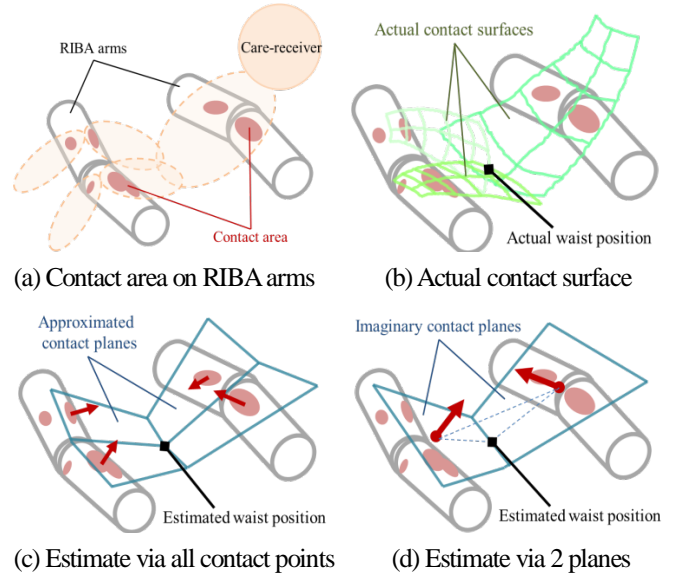


Fig.4 Concept of proposed waist estimation

ここで  $T$  はロボットの機械構造で決まる変換行列を表す。ロボットの腕を円柱で近似し、腕と被介護者は接触位置で垂直に接触すると考え、位置  $\mathbf{x}_{cop}$  における面法線ベクトル  $\mathbf{n}$  を求める。ここで、横抱きによる移乗時には、被験者の腰位置は RIBA の左右の腕の間に存在すると考えられる。加えて、腰位置が接触位置より重力方向に上がる可能性は低い。法線ベクトル  $\mathbf{n}$  の向きから背中と上腿の接触のみを抽出する。それぞれの腕において、内側上向きの法線ベクトルを持つ  $\mathbf{x}_{cop}$  のみを、背中もしくは上腿の接触点  $\mathbf{x}_c (c = 1, 2, \dots, C)$  とする。

#### 3.2 接触面と腰位置・腰角度の計算

3.1 で求めた接触点から背中側と上腿側の接触面を求め、接触面の交点を腰位置として計算する。被介護者とロボットの腕との接触面は図 4(b) のような曲面と想定される。しかし、曲面の式の算出や曲面間の交点の計算には時間を要するため、本稿では、より簡易な平面で近似する。全ての接触点に対応する接平面を求めて腰位置を計算する手法 (図 4(c)) と、背中側と上腿側の 2 つの接平面に統合してから腰位置を計算する手法 (図 4(d)) の 2 つの手法を提案する。

##### 3.2.1 全接触点を直接用いた腰位置・腰角度計算

前節の手法で抽出された  $C$  個の接触点において、接平面を求める。ある接触点のワールド座標上での位置を  $\mathbf{x}_c$ 、法線ベクトルを  $\mathbf{n}_c$  とすると、平面の式は式(3)となる。

$$\mathbf{n}_c \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_c) = 0 \quad \cdots (3)$$

$C \geq 3$  の場合に、 $C$  個の連立方程式を  $\mathbf{x}$  について解き、得た解を推定腰位置  $\hat{\mathbf{x}}_w$  とする。 $C > 3$  では解が一意に求ま

らないため、最小二乗法による最適解を $\hat{\mathbf{x}}_w$ とする。

次に、推定腰位置と背中・上腿側のそれぞれの接触点から推定腰角度 $\hat{\theta}$ を求める。ここでは、接触点 $\mathbf{x}_c$ を $S_c$ に基づいて加重平均し、複数の接触点を仮想的な一つの接触点（仮想接触点）に統合する。背中側の $B$ 個の接触点を $\mathbf{x}_b (b = 1, 2, \dots, B)$ 、対応するセンサ出力和を $S_b$ とし、背中側の仮想接触点 $\mathbf{x}_{bi}$ を式(4)で計算する。

$$\mathbf{x}_{bi} = \frac{1}{SB} \sum_b (S_b \mathbf{x}_b) \quad \dots (4)$$

ここで、 $SB = \sum_b S_b$ であり、背中側の腕上の圧力の総和を示す。上腿側の仮想接触点 $\mathbf{x}_{li}$ も同様に求める。 $\hat{\mathbf{x}}_w$ を起点とした2つのベクトル $\mathbf{v}_b = \mathbf{x}_{bi} - \hat{\mathbf{x}}_w$ 、 $\mathbf{v}_l = \mathbf{x}_{li} - \hat{\mathbf{x}}_w$ のなす角を推定腰角度 $\hat{\theta}_w$ とする。

$$\hat{\theta}_w = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{v}_b \cdot \mathbf{v}_l}{|\mathbf{v}_b| |\mathbf{v}_l|} \right) \quad \dots (5)$$

### 3.2.2 接触点を統合した腰位置・腰角度計算

ここでは、背中側と上腿側の接触面をそれぞれ一つの仮想的な接平面で近似して腰位置を求める。背中側と上腿側では同様の手順を用いるため、以下、背中側の仮想的な接平面の算出手法を説明する。

$C$ 個の接触点 $\mathbf{x}_c$ のうち、背中側の接触点を $\mathbf{x}_b (b = 1, 2, \dots, B)$ 、対応する法線ベクトルとセンサ出力和をそれぞれ $\mathbf{n}_b$ 、 $S_b$ とする。まず仮想的な接平面の法線ベクトル $\mathbf{n}_{bi}$ を決め、その後接触点（仮想接触点） $\mathbf{x}_{bi}$ を求める。 $S_b$ が大きい接触点ほど被介護者を支える面となる可能性が高いと考え、式(6)のように、 $S_b$ に応じた $\mathbf{n}_b$ の加重平均により仮想的な接平面の $\mathbf{n}_{bi}$ を決定する。

$$\mathbf{n}_{bi} = \frac{1}{SB} \sum_b (S_b \mathbf{n}_b) \quad \dots (6)$$

ここでの $SB$ も背中側の圧力総和を示す。次に仮想接触点 $\mathbf{x}_{bi}$ を求める。前項と同様に $\mathbf{x}_b$ の加重平均による簡易な計算も可能であるが、ここでは、 $\mathbf{n}_{bi}$ を満たす平面のうち全 $\mathbf{x}_b$ との距離を最小にする $\mathbf{x}_{bi}$ を求める。ある $\tilde{\mathbf{x}}_{bi}$ で決まる平面と各接触点 $\mathbf{x}_b$ との距離の和 $d$ は式(7)となる。

$$d = \sum_b \frac{|\mathbf{x}_b \cdot \mathbf{n}_{bi} - \tilde{\mathbf{x}}_{bi} \cdot \mathbf{n}_{bi}|}{|\mathbf{n}_{bi}|} \quad \dots (7)$$

最適化アルゴリズム<sup>[5]</sup>により $d$ を最小化する $\tilde{\mathbf{x}}_{bi}$ を求めて $\mathbf{x}_{bi}$ とし、式(8)のような仮想的な平面の式を得る。

$$\mathbf{n}_{bi} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_{bi}) = 0 \quad \dots (8)$$

背中側も同様に求め、2つの平面の方程式を得る。腰位置を一意に決定するには3つの平面の方程式が必要と

なる。そこで、背中側と上腿側の仮想接触点を通る垂直な平面を定義し、3平面の交点を腰位置 $\hat{\mathbf{x}}_w$ として計算する。求めた腰位置 $\hat{\mathbf{x}}_w$ と仮想接触点 $\mathbf{x}_{bi}$ 、 $\mathbf{x}_{li}$ から前項と同様の手順で推定腰角度 $\hat{\theta}_w$ を計算する。

## 4. 実験

実際のRIBAを用いて、健常者8名を対象に抱き上げ実験を行った。実験後にRIBAから取得した関節角と触覚センサの時系列データを用いて、腰位置・腰角度推定に要する時間と推定精度の評価を行った。

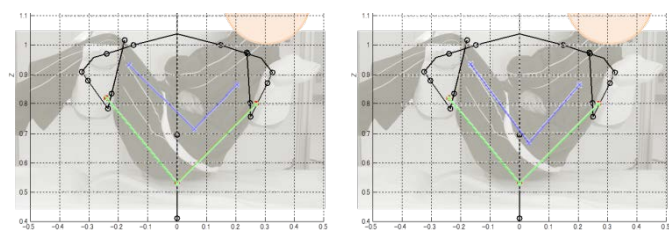
### 4.1 実験条件

21～54歳の8人の健常者（男3名・女5名）に対し、それぞれ4つの異なる抱き上げ姿勢を用意した。抱き上げた状態で30sec静止し、その間の触覚センサ出力とRIBAの実関節角を10msecごとに記録した。また抱き上げ状態の被験者の正面と上部から写真を撮り、被験者の腰位置と腰角度の参照とした。

なお、データの取得にはRIBAを用いたが、腰位置・腰角度の計算はIntel Core i7 3.2GHzを搭載したWindow 7のMatlab(R2012a)上で行った。RIBAはIntel Core Duo 2GHzであり、スペックが異なるため、厳密な演算時間の検討は難しい。まずは実装前の予備実験と位置づけ、演算時間の目安を見る。

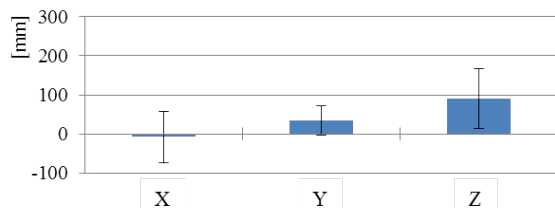
### 4.2 実験結果と考察

ある被験者における腰位置と各腕上の仮想接触点の推定位置と参照位置を図5に示す。横軸がロボット正面方向（Y軸）、縦軸が鉛直方向（Z軸）を示す。緑線が参照位置、青線が推定位置を示す。腕での接平面から推定する場合、理論的には腰の下端位置が求まるが、推定腰位置は鉛直上（Z軸正）方向に大きくずれている。8被験者4姿勢分の全32データでの、軸ごとの平均位置誤差と分散を図6に示す。なおX軸はロボットの腕方向（人間の両肩方向）を示し、Y軸・Z軸は図5に準ずる。棒の高さが各軸での平均誤差、バーが標準偏差を示す。平均的に見ても、参照腰位置よりも鉛直上側、かつ、背中寄りに推定された。本手法はロボットと人間を剛体と見なし、柔軟な接触を想定していない。また、接触面を平面で近似している。人間の上腿裏側は脂肪があるため柔軟な接触に、背中側は背骨に沿った比較的平面に近い接触が想定される。その結果、図5のような誤差が生じたと考えられる。

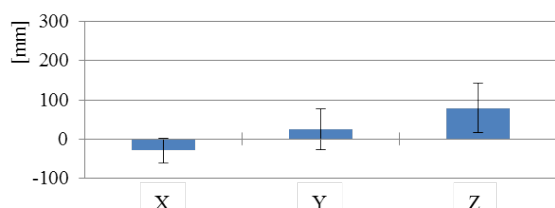


(a) Method A (b) Method B

**Fig.5 Estimated waist positions and angles**



(a) Estimation errors with method A

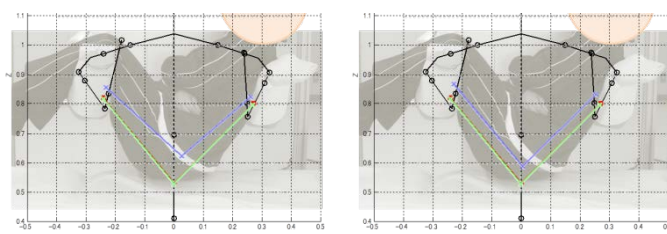


(b) Estimation errors with method B

**Fig.6 Waist position errors from reference**

平面で近似した場合には常に前述の誤差が発生すると思われる。そこで、各軸の平均的な誤差に基づき腰位置の推定結果に補正をかける。図6の各軸の平均誤差を推定腰位置から引くことで補正とした。また、左右の仮想接触点においても同様の補正を行った。補正後の結果を図7に示す。図7と図5を比較することで補正の効果が確認できる。図7の誤差は、写真で見たロボットと関節角から計算したロボットの姿勢の差異に起因すると思われる、現地点では修正が難しい。

補正後の推定値と参照値との誤差、計算時間を表1に示す。腰位置の推定誤差は手法Bが小さく、40～116mmの位置誤差になった。腰角度も13度程度の誤差幅に収まっている。推定時間を比較すると、手法Aが圧倒的に早く3msec以内で計算を終えている。スペックが劣るRIBAにおいても実時間での推定が期待できる。手法Bでは、仮想接触点の算出に最適化アルゴリズムを用いており、その繰り返し演算に計算時間を要していた。実装を考慮すると、手法Bでは大幅な時間短縮が必要となる。なお、制御時には、50mmまでの位置誤差に抑える必要があることが別の予備実験により判明した。更なる精度向上を目指して手法を検討する。



(a) Method A (b) Method B

**Fig.7 Corrected estimated waist positions and angles**

**Table 1 Estimation errors and calculation time**

		Method A	Method B
Err. of waist position [mm]	Ave.	87.71	78.04
	Std.	61.30	38.25
Err. of waist angle [deg]	Ave.	-4.16	-0.86
	Std.	14.45	12.72
Calculation time [msec]	Ave.	2.67	10.53
	Std.	0.10	0.90

## 5. 結言

本稿では、介護支援ロボット RIBA に搭載された面状触覚センサを用いた、被介護者の腰位置・腰角度の推定手法を提案した。実時間での推定可能性は見たものの、制御への利用を考慮すると、更なる精度向上が必要となる。

## 参考文献

- (1) T. Mukai, S. Hirano, H. Nakashima, Y. Kato, Y. Sakaida, S. Guo, and S. Hosoe: 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 System(IROS)*, pp.5996-6001(2010).
- (2) 向井利春, 平野慎也, 中島弘道, 吉田守夫, 郭士傑, 早川義一: 対象と全身接触を行う介護支援ロボットのための触覚情報を用いた繰り返し動作, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.77, No.782, pp.3794-3807(2011).
- (3) T. Mukai, and Y. Kato: 1 ms Soft Areal Tactile Giving Robots Soft Response, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.3, pp.473-480(2008).
- (4) 田村秀行: コンピュータ画像処理, オーム社(2002).
- (5) Lagarias, J. C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright: Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal of Optimization*, Vol.9, No.1, pp.112-147(1998).