

各種布地混在洗濯物の把握用指の試作と把握実験評価

大澤 文明^{*1} 柿倉 正義^{*2}

A Design Method for Effective Grasping of Washed Clothes

Fumiaki Osawa^{*1} and Masayoshi Kakikura^{*2}

We propose a mechanical hand for grasping washed clothes. The final aim of this research is to perform the task of laundries arrangement. The task needs some patterns of hand's operation and manipulator's movement. In this report we examine to automate separation of clothes from mounted clothes including several kinds of laundry and grasp of edges of those clothes.

Key Words: Clothes, Rotational Hand, Finger Nail, Pick Up, Turn Up, Grasping

1. はじめに

産業界においてロボットは人間に代わる高効率な労働力として製品の組み立てや搬送などに広く導入されてきた。また、危険な領域で人体を脅かすことなく作業を行う極限作業ロボットや、農地や森林、建設現場などの過酷な作業を伴う労働条件下において人を支援するロボットなどの研究もなされている。さらに、近年では、寝たきり患者を介護する医用・福祉ロボットのように、人間との接触の多い環境で使用されるロボットの研究も始まっている。

我が国の人口予測によると 21 世紀半ばには、国民の 3 人に 1 人が 65 歳以上になるといわれている。高齢者の一人暮らしの家庭では、家事作業などの個人にかかる負担が大きくなり、高齢者を抱える側においても家庭内における介護などの制約により社会活動が困難になることも予測される。一方で、生活を支援するホームヘルパーの絶対数も多くないために高齢化社会の進行に伴ってこのような状況が深刻化することが予測される。

このような状況から、将来において人々の生活の質を維持するために、日常生活においても人を支援するホームロボット、パーソナルロボットへの期待とニーズが高まっている [1]。これらのロボットによる家事作業の例としては掃除、調理および食事後片付け、洗濯物後片付けなどが期待されている [2]。

我々は家庭内でのロボットの活躍の場を家事作業の一つである洗濯物の後片付けに求め、乾燥後の洗濯物を整理するシステムの構築を目標としている。ここで扱われる物体は、布地とい

う柔軟物体であり、その操りには人間自身が無意識に行っている巧みな物体操作が要求される [3]。布地を扱い、作業を実行するためには、布地を把持できるロボットハンドの開発と布地という柔軟物体のハンドリングを確立しなければならない。

柔軟物体として布地を扱うロボットシステムとしては、特殊ハンドを用いてテーブル上に平たく置かれた布地を持ち上げる研究 [4] [5] や布地の平面展開作業を目指した布地の折れ重なり箇所の検出・識別法などの研究 [6] がすでに行われている。しかしながらそれらは単一の布地や整然と積み重ねられた布地を扱ったものであり [7]、その対象は洗濯物のような各種布地の混在したものではなかった。

本論文では、乾燥後の山積み洗濯物の後片付け作業を対象とし、そこで必要とされる各種布地に対応できる布地把握用ロボットハンドを提案する。設計・試作した布地用ハンドは、指先に回転機構 [8] とヒトの爪に相当する機能を有しており、ヒトが布地の平坦部や縁部を把握する場合に用いている摘みと捲り動作を実現することができるものである。提案するハンドの特徴は、指先の回転機構により布地平面部の手繰り寄せ操作量に制限がないことであり、確実に布地平面部を摘み把握することができる。また爪を用いてヒトの捲り運動軌道を生成することができるために、各種布地の縁を確実に捲り上げ縁を把握することができる。そして、従来の 2 指平行ハンドに比べて、布地の形状状態や把持位置に応じてエンドエフェクタの位置姿勢を制御する必要がなく、一定の姿勢で各種布地の縁と平面部を把持することができる。そのため、各種布地の混在する洗濯物の把持について汎用的なロボットシステムの構築が容易であり、各種布地に対応できる布地用ハンドとして有効である。

上記の目的のために以下では、最初にヒトの摘み動作と捲り動作による各種布地の把持に着目し、指先の運動軌道の特徴を解析する。次に、これより各種布地の平面部と縁部の把持に必

原稿受付 1999 年 10 月 15 日

*1 金沢大学大学院自然科学研究科

*2 東京電機大学工学部

*1 Graduate School of Natural and Technology, Kanazawa University

*2 Faculty of Engineering, Tokyo Denki University

要な動作機能を抽出し、その機能を満たすようにロボットハンドの指のデザインを設計・試作し提案する。そして最後に、把握実験により提案した布地用ハンドの有効性を報告する。

2. ヒトの布地操作

2.1 洗濯物整理作業

ヒトが山積みされた洗濯物を整理する場合の大まかな作業は以下のようなものである。まず山積み洗濯物の中から一枚を選び、その布地の表面部を摘み一枚分離する。次にもう一方の手で吊り下げられた布地の縁を把持し、両手で持ち替え動作を繰り返し行い形状の復元を行う。そして、形状を保ちつつ布地をテーブル上に置き、布地の縁を把持しながら展開作業を行う。最後に布の縁を把持し種類別に折畳む。

このように、ヒトは洗濯物を取り扱い作業する場合において、布地の表面や縁を把持している。

2.2 把握動作と爪先運動軌道

ロボットハンドへの応用を志向して、ヒトの把握動作の挙動について解析する。ここでは、布地表面の平らな箇所と縁の把握方法と、爪先の運動軌道の特性について探る。

はじめに、洗濯物の表面の平らな箇所を把持する場合について考察する。山積み洗濯物の把握対象である布地の表面状態は、下に積み重ねられた洗濯物の形状状態などの影響を受けやすく、皺などの凸部が生じていたり平らであったりする。布地の表面に大きな皺が存在する場合においては、その凸部を親指と他の4指で挟み容易に把持している。一方、布地の表面状態が平らである場合においては、凸部が存在しないため Fig. 1 (a) に示されるように布地の平面部を2指の腹で手繰り寄せて摘み把持している。この場合の例では、はじめに、洗濯物の表面に2指の腹部を押しあて、次に、指の腹部を布地表面に押し当てながら手繰り寄せ操作を行う。この操作により挫曲した布地の凸部を挟み把持している。手繰り寄せは指の腹と布地間で滑りが生

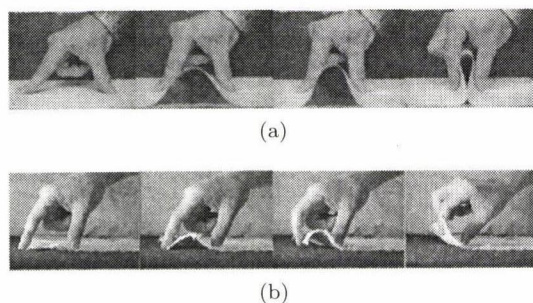


Fig. 1 Movement of grasping washed clothes by human hand (a: Pick up b: Turn up)

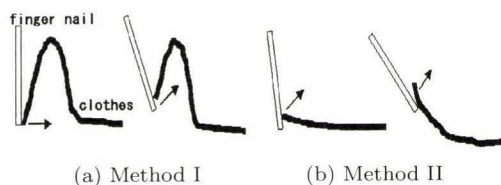


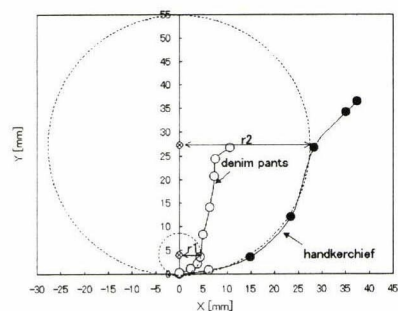
Fig. 2 Method for turn up an edge of clothes by human

じないように指の腹部の押し付け圧力を制御して操作を行っている。

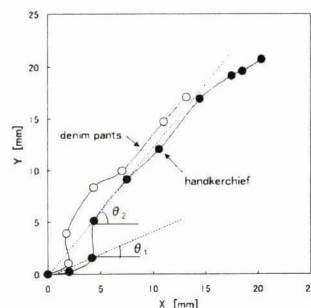
次に、洗濯物の縁を把持する場合について考察する。この場合の例では、Fig. 1 (b) に示されるようにまず布地の縁付近に親指を押し当て布地をテーブルに対して固定する。次に他の4指の爪先を布地の縁に接触させながら動かし、所定の高さの位置まで布地の縁を巻き上げる。そして、固定指と動指の腹で縁を挟み把持する。ヒトが布地の縁を巻き上げる方策としては、Fig. 2 (a) に示されるように爪を縁とテーブル間に押し当てながら挫曲を生じさせ巻き上げる方法 I と、Fig. 2 (b) に示されるように縁とテーブル間に爪先を挿入し端面を利用して持ち上げる方法 II が考えられる。

ここで、それぞれの方法を用いて巻き動作を行った場合のヒトの爪先の運動軌道の特性について述べる。Fig. 3 は、ヒトが方法 I および方法 II を用いて布地の縁を巻き把持する場合の爪先の運動軌道を示す。ここでの把握の対象は家庭内で扱われる布地の中で曲げ剛性の高いデニムパンツと曲げ剛性が低いハンカチである。

方法 I においては、Fig. 3 (a) に示されるように円軌道を描くように爪先を動かし布地の縁を巻き上げる傾向がある。また、この場合における円軌道の半径はデニムパンツとハンカチでは大きく異なる。これより、方法 I の巻き動作における爪先の円軌道の半径は、布地固有の曲げ剛性に影響を受けることが分かる。ヒトは、無意識に布地の曲げ剛性を指先により識別し、布地の種類に応じて最適な爪先運動軌道を生成しているものと思われる。また、その一方で、ハンカチを巻き上げるときの爪先円軌道半径 25 [mm] を生成することによりデニムパンツおよび T シャツ、タオルなどの縁も同様に巻きあげることが可能であっ



(a) Method I



(b) Method II

Fig. 3 Locus of the finger nail

た。これらより、ヒトは布地の種類に応じて異なる爪先運動軌道を生成しているものの、円半径 25 [mm] 程度の同一の爪先運動軌道を生成することにより家庭内で取り扱われるほとんどの洗濯物の縁を捲りあげ把握することが可能であるともいえる。

方法 II においては、Fig. 3 (b) に示されるように傾き θ_1 の直線軌道を描くように爪先をテーブルと布地間に挿入し、次に傾き θ_2 の直線軌道を描き爪先で縁を持ち上げている。これは、捲り動作中に爪先の運動軌道の切替が行われていることを示している。

以上についてまとめると、布地の操作には布地の表面と縁の把持が必要であり、ヒトは指の腹を用いた手繰り寄せ操作による摘み動作と爪を用いた縁の捲り動作および持ち上げ動作によりそれぞれの箇所を把握していることが分かる。

3. ロボットによる布地操作

3.1 把持位置

本研究で目標とする布地操作は、(1):一枚分離作業(山積みされた洗濯物から一枚を選び分離)、(2):展開作業、(3):畳み作業という三つの作業で構成される「洗濯物の後片付け作業」である。(1):一枚分離作業では、濱島らの手法 [9] を用いて Fig. 4 (a) に示される把持目標位置を算出し、この位置において一枚のみ布地を把持する。このとき、把持する布地の表面に凹凸状の皺が存在しない場合においては、テーブル上に平たく置かれた布地と同様の取り扱いが有効であり、4.2 で後述するように、爪を引っ込めた状態での把持が必要である。これに関してはすでに詳細に実験・検証が行われており [8]、その有効性が確認されている。次に (2):展開作業および (3):畳み作業では、Fig. 4 (b) に示される布地の縁位置を把持してあげ畳む作業を実行することになる。布地を扱うロボットの基本的作業では、平たく置かれた布地の平面部と縁部の安定した把握が必要になる。

3.2 2指平行ハンドの布地把持の問題

本節では、上記の把持位置において対応できる布地把持用ハンドについて検討する。そこで、布地用の特殊ハンドに要求される機能を抽出するために、2指平行ハンドによる布地の把持についてその問題点を探る。このハンドには、閉塞時にフィンガ間に十分な把握力がかかるように直方体の小爪を取り付け、滑り抑制のためのラバーをフィンガの先端と把握面に貼りつけてあるものとする。以下に布地の平らな表面と縁を把握する場合の 2 例について考察する。

はじめに、布地の平面部の把握について考察する。2指平行ハンドを用いた一連の把握動作を Fig. 5 に示す。布地表面に

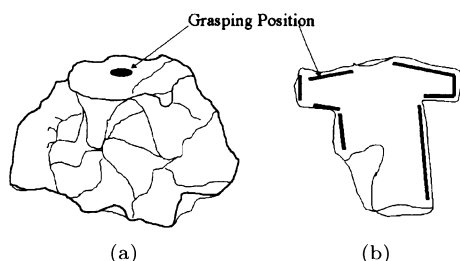


Fig. 4 Grasping position for the task of laundries arrangement

フィンガを十分に強く押しあてハンドを閉じていくと、布地は Fig. 5 (a) に示すような小さな曲げ変形を起す。さらにハンドを閉じていくと曲げ変形が徐々に大きくなり、ハンドを完全に閉塞することにより Fig. 5 (b) に示されるように曲げ変形により生じた凸部を挟み把握することができる。そのため、布地を確実に把握するにはこの曲げ変形により生ずる凸部の高さ h を十分に高くする必要がある。そのためには布地の手繰り寄せ操作量を大きくしなければならない。

いま、指と布地間の最大静止摩擦係数を μ 、布地とテーブル間の最大静止摩擦係数を μ' 、オイラー座屈荷重を F_0 、指が布地を押す力を P とすると把握の条件は

$$P\mu - P\mu' > F_0 \quad (1)$$

である [10]。この条件を満たす場合には、ハンド閉塞時にフィンガと布地間に滑りが生じない。そのため、フィンガの開き幅を l とすると手繰り寄せ操作量 x および布地の凸部の高さ h はそれぞれ

$$x = \frac{l}{2}, h = \frac{l}{2} \quad (2)$$

となる。すなわち、布地を把持したときの高さ h はフィンガの片側ストロークに等しくなる。一方、この条件式 (2) が満たされない場合にはフィンガと布地間に滑りが生じるため、フィンガによる布地の手繰り寄せ操作量は少なくなる。そのため曲げ変形の高さ h も低くなり安定に把持できない。

すなわち、布地の把握時の高さ h は、布地とフィンガ間に生じる滑りの有無とフィンガ開閉ストロークにより決まる。

そのため布地の平らな表面部を安定に摘み把持するには、フィンガ開閉ストロークの十分に広い 2 指平行ハンドを用いることが必要になる。しかしながら、このようなハンドを用いると把持の位置誤差を生じたり、繊細な操作が困難になる。そこで、布地用ハンドには、2 指平行ハンドの指先に自由度を付加し、小さなフィンガ開閉ストロークで大きな手繰り寄せ操作が実現できる機能が必要になる。

次に、布地の縁を把持する場合について考察する。2 指平行ハンドを用いた布地の縁の把握には、2 指で布地の縁を挟まなくてはならない。そのため、Fig. 6 に示すように布地の状態に応じてロボットの手先の位置姿勢を制御する必要がある。例えば、

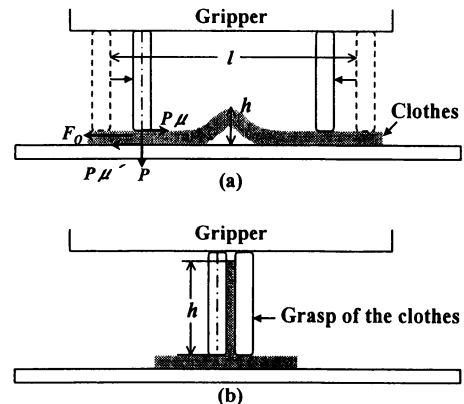


Fig. 5 Method of pick up a clothes by two finger hand

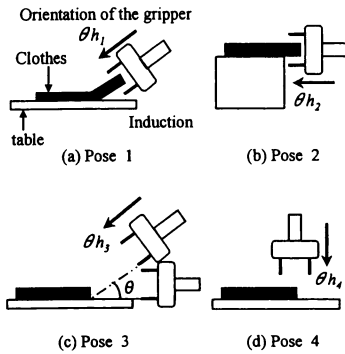


Fig. 6 Pose of end effector for grasp of edges of the clothes by two finger hand

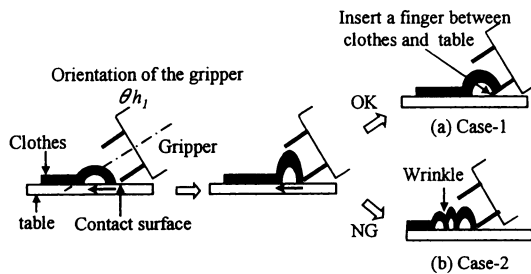


Fig. 7 Method of grasp of edges of the clothes for Pose 3 by two finger

Fig. 6 (a) (b) に示すように布地の縁とテーブル間に大きな隙間が存在する場合や布地の縁がテーブル端より外側にある場合などにおいては、布地の縁の接線方向に沿って手先の位置姿勢を制御することにより把握が可能である。しかしながらテーブル上の布地は、縁とテーブル間に大きな隙間が存在するとは限らない。むしろ、一般的には隙間が存在しない場合を想定する必要がある。この場合の例においては Fig. 6 (c) と (d) に示すような二つのアプローチが考えられる。Fig. 6 (c) に示すアプローチでは、ある姿勢角でテーブル面にハンドの片側の指先を接触させテーブル面に沿い指先を誘導することにより布地とテーブル間に指を挿入し把持するものである。このとき、曲げ剛性の高い布地を扱う場合には、Fig. 7 (a) に示されるように布地の縁付近に曲げ変形を伴う挫曲ができるため、そのときに生ずる復元力により指先に縁が移動し指の挿入が可能になる。しかしながら、曲げ剛性の低い布地を扱う場合においては Fig. 7 (b) に示されるように縁付近において多くの皺が生じてしまい、安定した指の挿入ができない場合がある。また、このアプローチは、ハンドの姿勢角や指の形状およびテーブルと布地間の摩擦係数などにより縁の挙動が影響を受けるため、それを予測できないという欠点がある。次に、Fig. 6 (d) に示されるアプローチについて述べる。この方法は Fig. 8 に示すように鉛直方向へハンドを下し、フィンガをテーブルと布地表面に押し当てながら摘み把握するものである。このアプローチは、手先の位置姿勢の制御が容易であるが、布地の縁の状態により常時安定した把持が期待できない。例えば、布地の縁の接線方向が上向きである場合においては、片側のフィンガの手繰り寄せ操作により

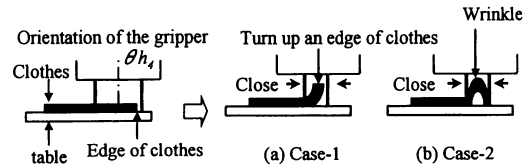


Fig. 8 Method of grasp of edges of the clothes for Pose 4 by two finger

Fig. 8 (a) に示すように縁が上向きに捲れあがる。このときフィンガのストロークが大きければ高く捲れあがるため、把握時の接触面積が大きくなり安定把持が可能になる。一方、布地の縁の接線方向が下方であれば、Fig. 8 (b) に示すようにハンド閉塞時に布地の縁付近に無数の皺が生じる場合があり安定した把持が期待できない。これらより、2指平行ハンドは布地の縁の把握に適していないことが分かる。

そこで、前章で示したヒトの捲り動作の解析結果をもとにロボットハンドに必要な機能を抽出する。ヒトの捲り把握の場合においては、爪を布地とテーブル間に挿入して端面を利用して持ち上げる方法 II と布地の縁に爪先を接触させ円弧軌道を描き捲りあげる方法 I が考えられた。それぞれの方法をロボットを用いて動作させる場合における問題点を考察する。方法 II は、布地とテーブル間に爪を挿入するためにロボットの爪先の位置姿勢を制御しなければならない。また、2指で布地の縁を深く挟み安定に把持するには、縁の端面を爪で持ち上げた後にフィンガの奥方向へ布地の縁を手繰り寄せするという複雑な操作が必要となる。一方、方法 I は、爪先を布地の縁に接触させた後に円軌道を生成するという比較的単純な操作により作業を実行することが可能である。また捲り上げられた縁の高さは安定把握に十分な高さになることが期待できることから、ロボットによる作業方策としては方法 I が適していると考えられる。これより、布地の縁を捲り上げ把持するためには、ハンドに爪を付加し、この爪先が円軌道を生成する機能を付加することが効果的である。この場合において、同一の爪先軌道で種類の異なる洗濯物の縁を捲り上げるために、捲り軌道は円弧半径 25 [mm] 程度以上にすることが望ましいことになる。

以上をまとめると、布地用ハンドに必要な機能は

- 大きな手繰り寄せ操作
- 爪先の円弧軌道の生成

の 2 点に集約される。

4. 指先に回転自由度と爪を有するハンド

4.1 ハンドの機構と機能

前章で述べたように布地の把持に必要なハンドの基本動作は、布地を摘み把持するための布地表面の手繰り寄せ操作と布地の縁を捲り上げ把持するための円軌道を描いた爪先動作の二つである。これらの動作・機能を同時に満たすために Fig. 9 に示される布地用ハンドを設計・試作した。このハンドは 2 指平行ハンドの指先に回転機構とヒトの爪に相当する機能を付加したものである。

ハンドの指先に取り付けられた回転体はステッピングモータ：0.36°/step, 100 [Hz] により正転・逆転が可能である。また、回

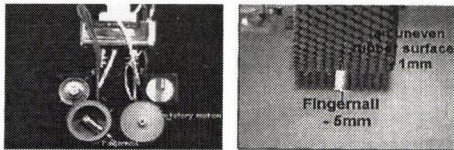


Fig. 9 Robotic hand with a rotation mechanism and one finger nail

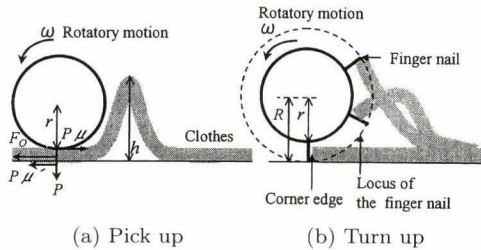


Fig. 10 Movement of pick up and turn up by Robotic hand

転体の表面には、布地表面と回転体の接触時に生ずる滑りを抑えるために高さ 1 [mm] の凹凸ラバーが貼りつけてあり、この回転体の表面からは直径 5 [mm] の円柱形 $\phi 5$ の爪が伸び縮みする。爪は、回転体の中に埋め込まれた電磁石可動型リニア振動アクチュエータにより、伸縮制御するものである。回転体を支える厚さ 1 [mm] の銅板には歪みゲージが貼りつけてあり、洗濯物を把持した際の板の歪みを測定することができる。

本ハンドはヒトの指先の腹部および爪先部をそれぞれ回転体の表面部と回転体表面から伸び縮みする爪において置換したものである。ヒトが平たく置かれた布地の表面を掴み把持するときの手繰り寄せ操作は、Fig. 10 (a) に示されるように布地表面に回転体を押し付け巻き込み方向へ回転させることにより実現できる。そして、フィンガ開閉ストロークに影響されることなく広範囲の手繰り寄せ操作が可能である。このときハンドの押し付け力を制御することにより回転体表面と布地間の滑りを抑制することができ、曲げ変形により生ずる凸部の高さ h を十分に得ることができるため安定把持できる。また、Fig. 10 (b) に示されるように回転体表面から爪を伸ばし布地の縁にひっかけた状態で回転機構を駆動することにより、ヒトが布地の縁を捲り上げるときと同様に爪先の円弧軌道を生成することができる。種類の異なる洗濯物に対しても同一の爪先円弧軌道により縁の捲りを実現するために、回転体の直径は 50 [mm] としてある。

4.2 把握方法

本ハンドを用いて布地の平面部を掴み把持する方法には、Fig. 11 (a) に示されるようにハンドを閉塞した状態で回転機構を回転させ布地を巻き込み把握する方法と、Fig. 11 (b) に示されるようにハンドを開いた状態で回転機構を回転させ布地を巻き上げた後にハンドを閉じる把持方法がある。このうち、後者の方法は、前後左右四つの回転体を布地の表面に対して均等に押し付けなければ布地の巻き込み量に偏りができるため、把持位置に誤差が生じてしまう。そのため、本報告の実験では前者の方法により平らに敷かれた布地の表面部を把持する。

次にこの把握方法により山積み洗濯物の一枚分離把持について述べる。この場合には、積み重ねられた布地間において、最

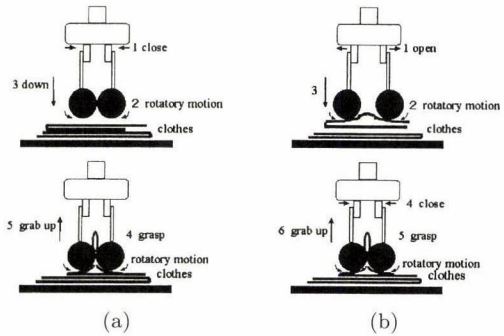


Fig. 11 Method of pick up a clothes by robotic hand

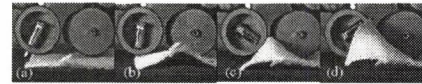


Fig. 12 Movement of turning up a corner edge of clothes by robotic hand

大静止摩擦力は様々に変化するために複数枚を把持してしまうケースも考えられる。しかしながら、実際の山積み洗濯物の場合においては、把持する布地表面に多くの皺によるたわみが存在するとともに各布地間には、皺や折れ重なりによる隙間が点在している。そのために、ハンドを上方から軽く接触させ、ゆっくり回転駆動することにより布地間の摩擦に大きな影響を与えずに、把持する布地表面の皺によるたわみの伸びや布地の横方向への伸縮性を利用して、下に位置する布地に比べて大きく手繰り寄せることができる。これにより、把持対象である布地表面が回転体に少し巻き込まれた時点で回転駆動を停止することにより、一枚のみを確実に把持することができる。ここでもし複数枚を把持してしまった場合には、ハンドを上下左右に揺さぶることにより不安定把持下にある 2 枚目以降の布地を振り落とすことが可能である（ただし、複数枚の把持の確認は現在のところ人の目視によっている）。また、実際に複数枚の布地を巻き取ってしまった場合においても、同一衣類の表裏部であったり折れ重なり部である場合が多い。なお、手動制御による把持実験では一枚分離把持の成功率は 95% 以上の結果が得られた。

本ハンドを用いた布地の縁を把持する方法について述べる。この場合においては、Fig. 12 に示されるように回転体の表面より爪を伸ばした状態で爪を布の縁に接触させ、回転体を巻き込み方向へ駆動することにより縁を捲り上げる。その後、ハンドを閉塞することにより布の縁を把持する。

5. 平面部の把持動作計画

5.1 ハンド押し付け力と状態遷移の識別実験

本ハンドを用いて山積み洗濯物から一枚のみを把持して分離するには、ハンドを鉛直方向に下げいき回転体が布地に接触した後、布地への押し付け力を制御する必要がある。しかしながら、把握に必要なハンドの押し付け力は、把持する布地の種類やその下にある布地の種類により異なる。また、積み重ねられた布地の枚数や布地表面の皺などの状態からも影響を受けることが分かっている [11]。実際の山積み洗濯物は、以上の環境

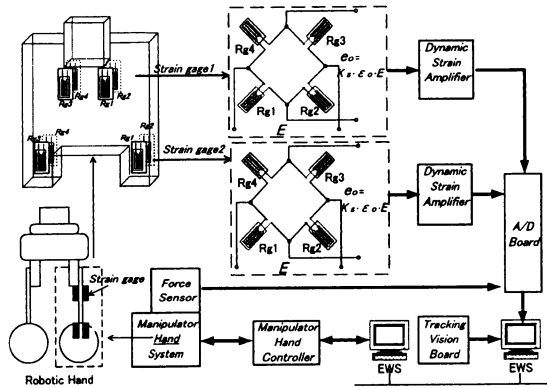


Fig. 13 Experimental System

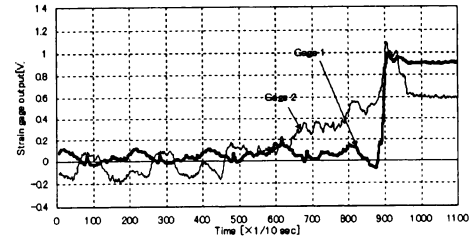
条件も様々であるため一枚のみ把持し分離するための一定の押し付け力を定めるのは困難である。

したがって、この作業を自動化するには、ロボットが布地との接触情報をもとに、布地の状態とその変化を識別し、その状態遷移に合わせて動作計画を行わなければならない。以下に一枚分離作業におけるハンドと布地間の非接触、接触、把握段階の状態遷移の識別が可能であるか否かを調べる実験を行った結果を示す。

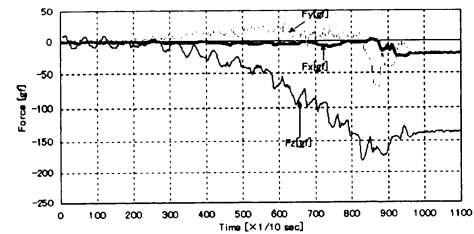
実験システムの概略構成を Fig. 13 に示す。布地用ハンドは 6 自由度位置制御型マニピュレータ安川電機社製 MOTOMAN に装着されており、マニピュレータのリスト部には 6 軸力覚センサ BL Autotec MINI が取り付けられている。回転機構を支える 2 枚の銅板の上の位置と下の位置に歪ゲージが貼り付けてあり、本稿においてそれぞれを Strain gage 1 および Strain gage 2 と記す。なお、歪ゲージの温度変化の影響と板の圧縮・引張りずみを消去し、板の曲げ応力のみ測定できるように回路を製作した。実験試料は、布厚 1 [mm] の不織布（フェルト）とした [12]。布地用ハンドを閉塞し回転体を回転させた状態で、山積み洗濯物の上方から鉛直方向（ベース座標系 Z 軸方向）へ 3 秒ごとに 0.3 [mm] 移動させ、サンプリングタイムタイム $T = 100$ [ms] で各センサ信号を計測した。布地用ハンドの回転体がフェルトを十分に巻き込み把握が確認できた時点で、回転機構部の駆動とハンドの移動を停止させ計測を終了した。なお、計測結果と実際の動作状態を比較するために実験の様子をビデオで録画した。

以下に、Fig. 14 に示される測定結果と実際の動作状態の比較について述べる。

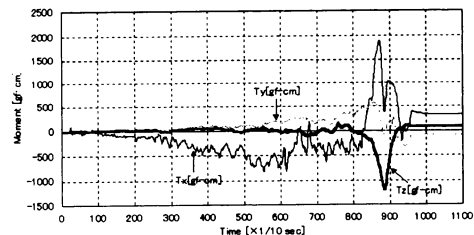
- (1) 非接触段階：実験開始後 0[s] から 14[s] の間、ハンド指先に加わる力・モーメントの計測値が 0 に近いことから、ハンドが布地に非接触であることが推測できる (Fig. 14 (b), (c))。
- (2) 接触段階：実験開始後 15[s] 付近で布地用ハンドの四つの回転体のうち一つがフェルトにわずかに接触している。これは、Fig. 14 (b) に示される F_z の値と Fig. 14 (c) に示されるモーメント T_x の値が 15[s] 前後から変化し始めていることより推測できる。15[s] から 90[s] 前後の間、布地用ハンドの回転体がフェルト表面に接触しながら滑りを起こしている。この期間 Fig. 14 (a) に示される Strain gage 1 の値に変化が見られないのに対し、Strain gage 2 の値が徐々に上昇した。これは、接



(a) Strain gages output



(b) Force



(c) Moment

Fig. 14 Experimental results of picking up a clothes by robotic hand. sample: felt 1.01 [mm] in thickness

触段階における布地用ハンドの回転体と布地表面間に生じる滑りを示しているものと思われる。また、Fig. 14 (c) に示されるモーメント T_x の値にも変化が見られた。

(3) 把握段階：90 [s] 後、布地用ハンドは向かい合う二組の回転体のうち片側の一組でフェルトを巻き込み、続いてもう一組の回転体もフェルトを巻き込み、完全に把持できる位置まで巻き上げた。計測結果を調べると、布地を巻き込み始めた 90 [s] 付近で Fig. 14 (a) に示される Strain gage 1 の出力値が鋭く立ち上がり、その後 1 [V] 付近で一定となっている。これは、フェルトを把握した際に布地用ハンドの向かい合う 1 枚の銅板が外側に歪むためであり、これにより布地の把握段階を認識することができる。またこのとき、Fig. 14 (c) に示されるモーメントの値も大きな変化を示した。この信号は、布地の巻き込み時に起こるものであり、布地の巻き込み状態により異なる。

以上の結果より、ハンドの押し付け力 F_z およびモーメントの計測値から、ハンドと布地間の非接触と接触段階の識別が可能であることが分かる。また、Strain gage 2 の計測値によりハンドの回転体と布地間の接触段階における滑り状態の推定が可能である。また、Strain gage 1 の値により布地の巻き込み開始と把握段階の識別が可能であり、モーメントの計測値により巻き込み開始と巻き込み状態が推測できる。なお、上記の実験において、センサ信号にノイズが重畳しているが、これは、ハンドの移動動作と向かい合う回転体の回転接触に伴いハンドの薄

板が振動するためである。これに対しては、板を厚くし振動を抑制するとともに、ハンド移動時において回転駆動を停止することにより、ノイズ成分を軽減することが可能である。

なお、綿 100% (布厚 0.22 [mm])、レーヨン 100% (布厚 0.25 [mm])、ポロシャツ、パンツ、T シャツなどについても実験を行い上記同様の傾向がみられた。また、ジーンズ素材の布地のように曲げ剛性が高く滑りやすい布地の場合には、回転体と布地の間で滑りが暫く続き Strain gage2 の信号が顕著に現れた。このことから、本ハンドを用いた巻き込み把持の自動化においてこれらのセンサ情報の活用が有効であることが分かった。

5.2 動作計画

上記の実験結果をもとに考察した動作計画を以下に示す。

step 1. ハンドの回転体を停止した状態で、布地の上方からハンドを鉛直下方向へ移動。

step 2. ハンドの回転体表面が布地の表面に接触したらハンドの移動を停止。制御則を次のように定める。

$IF F_z > -10 [gf] THEN$ ハンドの移動停止

step 3. ハンドを鉛直下方向へ 2 [s] ごとに 0.3 [mm] 移動。

step 3. ハンドを鉛直下方向へ 2 [s] ごとに 1 [mm] 移動。

step 4. ハンドの回転体を巻き込み方向へ 90° 回転。

step 5. **step 4.** で布地が回転体に巻き込まれなければ **step 3.** へ。ただし、Strain gage2 の信号より滑りを検出・推定したら敏速に処理を実行するために **step 3.** へ。滑り検出・推定の制御則を次のように定める。

$IF Straingage2 \text{ 信号} > 0.3 [V](2[s]) THEN$ 滑り推定

布地が回転体に巻き込まれたらその 2 [s] 後に回転体を停止し把持を達成。制御則を次のように定める。

$IF Straingage1 \text{ 差分} > 0.3 [V](2[s]) THEN$ 回転停止

ただし、Strain gage1 差分とは、サンプリングタイム 2 [s] ごとの計測値とする。

上記の動作計画を用いて平たく積み重ねられた 5 枚のタオルおよびポロシャツについて一枚分離把持の実験を行った。その結果、ハンドの回転体が布地表面に接触後、把持するまでに要する時間はタオルの場合で 2 [s] から 80 [s]、ポロシャツの場合で 40 [s] から 120 [s] くらいであった。布地の種類や表面状態などにより把持達成に要する時間は異なるものの、一枚分離把持の達成精度は約 95% 以上であった。なお、同じ皺を形成して重なり合っているタオルの場合において、その皺部を巻き込むことにより同時に 2 枚を把持するケースがあった。この場合には、一度テーブル上に再配置し、再度、一枚分離作業を実行する必要がある。

6. 縁の把持動作計画

6.1 爪の有効性と最適ストロークの検証

本ハンドは爪を用いて布地の縁を大きく巻き上げることで縁を把持する。ここでは、爪を用いた巻き把持について本ハンドの有用性を調べる。また、巻きに適した爪のストロークにつ

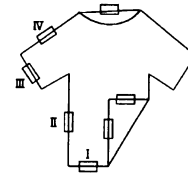
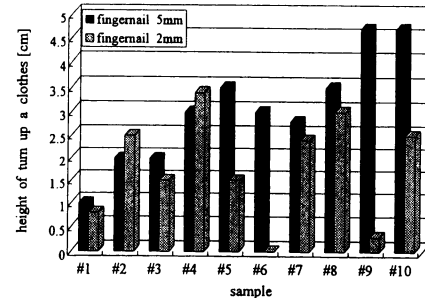


Fig. 15 Target grasping position



#1:polyester 100%(0.47 mm in thickness). #2:rayon 100%(0.25 mm in thickness). #3:down 100%(0.3 mm in thickness). #4:towel(1.18 mm in thickness). #5:felt(1.01 mm in thickness). #6:two pieces of felt. #7:cotton 100%(0.22 mm in thickness). #8:cotton 100%(0.68 mm in thickness). #9:cotton 100%(jeans 1.03 mm thickness). #10:cotton 100%(judo clothes 1.28 mm in thickness)

Fig. 16 height of turn up

いても考察する。このため、Fig. 15 に示される T シャツの位置において爪のある場合とない場合でそれぞれ把持実験を行った。T シャツの下には、不織布 (フェルト) が敷かれており巻き動作時に滑りが生じないものとする。そして、爪先および回転体の表面を T シャツの縁に接触させた後に回転体を駆動し巻き把持を行った。なお、ここでの爪のストロークは 5 [mm] とした。実験の結果、爪ありの状態では、すべての位置の縁を確実に巻き上げ把持することができた。しかしながら爪を縮めた状態では、縁を確実に巻き上げることができなかった。これより布地の縁の巻き動作において本ハンドの爪の有効性を確認した。

次に最適な爪のストロークを調べるために爪の長さの違いによる巻き動作への影響を調べる実験を行った。爪のストロークは、5 [mm] および 2 [mm] とし、10 種類の布地に対してそれぞれ巻き動作を行い、縁の巻き具合を調べた。巻き具合の評価は、ハンドの先端から巻き上げられた布の縁までの高さとした。この高さを本論文においては巻き高さとして記す。実験の結果を Fig. 16 に示す。この結果よりストローク 5 [mm] の爪は 2 [mm] の爪に比べ、巻き高さの値が相対的に大きくなるという傾向が見受けられた。また、厚手の布地や 2 枚重ねの布地の場合においては、ストローク 2 [mm] の爪では巻き動作中に爪から布の縁が外れ落ちることが多くなり確実な巻き上げが困難であった。これより各種布地の縁を巻き上げ把持するにはストロークの長い爪が適していることが明らかになった。以上の結果より、本ハンドの爪のストロークは 5 [mm] としてある。

6.2 状態遷移の識別と動作計画

布地の縁を把持するときの実行手順を Fig. 17 に示す。布地の縁を把持する場合、巻き動作後にハンドを閉じて布地を把握する。このときに、布地の縁の巻き具合をロボットが認識しな

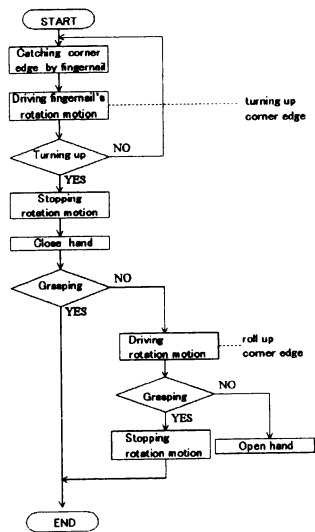
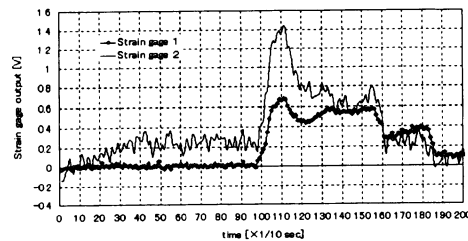


Fig. 17 Processing sequence for turning up a corner edge of clothes by robotic hand

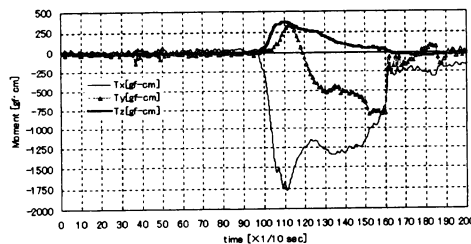
ければ次の動作に移れない。これは、捲れ上がった布の縁の高さが低い場合とまったく捲れなかった場合とでは次の動作が異なるからである。前者の場合には、ハンドを閉塞し向かい合う回転体を巻き込み方向へ回転駆動することにより縁を把持可能な位置まで巻き上げる必要がある。また、後者の場合には、爪先の位置をずらし再度捲り動作を実行する必要がある。そこで、布地の捲れ状態が識別可能であるか否かを調べる実験を行った。実験は、布地用ハンドの爪先が縁に接触し捲り上げる一連の動作についてハンドの爪先に作用する曲げ応力、モーメントをサンプリングタイム $T = 100$ [ms] で計測を行った。厚さ 0.59 [mm] 綿 100%の布地をストローク 5 [mm] の爪で捲り上げたときの計測結果を Fig. 18 に示す。

実験開始後、0~9 [s] の間、モーメントと歪みゲージの値が 0 に近く、爪と布地の縁が非接触であることが分かる。また、10 [s] 後付近でモーメントと歪みゲージの値が急激に変化し、爪と布地の縁が接触したことが分かる。その後、モーメントと歪みゲージの値は緩やかに 0 に近づいている。しかしながら爪が布地の縁に接触した後、引っ掛かりが外れた場合には、モーメントと歪みゲージの値は急激に 0 に近づいた。これらの結果より、ハンドの爪先に加わる力覚情報より縁の捲れの認識が可能であることが分かる。これより動作計画では、モーメントと歪みゲージの信号の急激な変化を検出した後に回転駆動を停止しハンドを閉塞し縁を把握することとする。なお、縁の捲れ具合は、これらのセンサ情報と併用してトラッキングビジョンを用いて縁部を追跡することにより正確に知ることが可能になる。捲り動作中において爪側の回転体の側面から縁を追跡した様子を Fig. 19 に示す。ただし図中の X および Y は左上角を原点とした 512×512 [pixel] の画像平面内における画像の座標である。

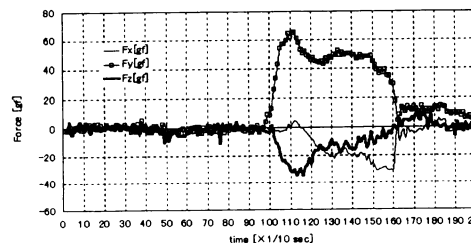
次に、布地の縁の捲れを確認した後、ハンドを閉塞し布地を把握する。しかしながら、布地が把握されていない場合、再度捲り動作を実行する必要がある。このため、布地の把握をロボットが識別できなくてはならない。そこで、布地の縁の把握を識



(a) Strain gages output



(b) Force



(c) Moment

Fig. 18 Experimental results of turn up a clothes by robotic hand (sample: cotton sheeting fabric 0.59 [mm] in thickness)

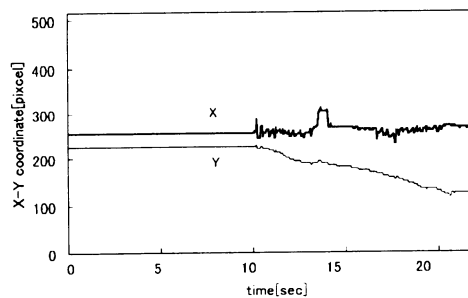


Fig. 19 Motion of the edges by using visual tracking

Table 1 Strain gage output for grasping edges in Fig. 15

grasping position	I	II	III	IV
strain gage output [V]	2.14	1.33	2.04	1.79

別可能であるか否かを調べる実験を行った。実験は、布地を把握した際にハンドの銅板に作用する曲げ応力を歪みゲージ: Strain gage1 により計測した。なお、ハンド閉塞時の歪みゲージ出力をオフセット 0 [V] とし、Fig. 15 中の T シャツの番号を付したところを把握した。把握箇所の付近をそれぞれ 5 回ずつ測定し、その平均の測定結果を Table 1 に示す。また、布厚の異なる十数種類の布地におけるハンド閉塞時の歪みゲージ出力を Fig. 20 に示す。この結果から、歪みゲージの出力値は布地の厚

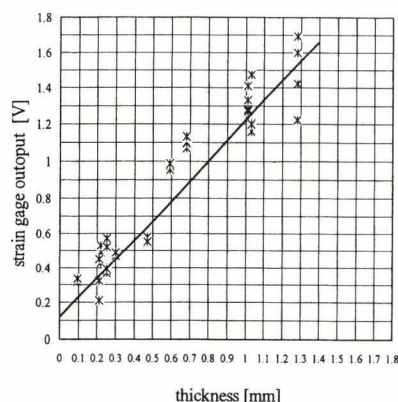


Fig. 20 Relation between strain gage output and thickness of the clothes

さに比例することが分かる。これらの結果より、洗濯物の把握は歪みゲージの出力信号を検出することにより識別することとした。また、この歪みゲージの値は布厚を推定することにも使用可能であることが分かった。

以上の認識則を用いて動作計画を実行した。ポロシャツ、デニムパンツなどの曲げ剛性の高いものについては、安定した縁の把持が可能であった。一方、曲げ剛性の低いタオルなどは、巻き上げ時の力覚信号に大きな変化が表れにくいため巻りの識別は困難であったが、回転体を一定回転駆動した後に次の動作に移ることにより把持の達成率はほぼ 100%であった。この場合においては、トラッキングビジョンを用いた縁の追跡を併用することにより安定した識別が可能になるものと思われる。また、布厚の薄いポリエステルのように巻れ高さの低い布地の場合においてもハンド閉塞後にさらに回転体で縁部を巻き込むことにより 95%以上の高信頼で把持が達成できた。

7. ま と め

種類の異なる布地物体が混在する洗濯物を把持するために最

適なロボットの指の設計を目指して、平たく置かれた布地の平面部と縁をヒトが把持するときの摘み動作と巻き動作を解析し、その結果を利用して布地用ハンドを設計・試作した。そして、把持の動作計画を立てるとともに洗濯物の把握実験により提案した布地用ハンドが各種布地の把持に有効であることを実証した。今後の課題としては把握動作における視覚情報の有効利用が有効であると考えている。

参 考 文 献

- [1] 日本機械工業連合会, 日本ロボット工業会:平成 9 年度パーソナルロボットの市場動向調査研究報告書, 平成 10 年度 5 月, 2000.
- [2] 平野新一:“パーソナルロボットの市場予測”, ロボット, no.128, pp.17-22, 1999.
- [3] 「特集 柔軟物操作」, 日本ロボット学会誌, vol.16, No.2, 1998.
- [4] E. Torgerson and F.W.Paul: “Vision Guided Robotic Fabric Manipulation for Apparel Manufacturing,” Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp.1196-1202, 1987.
- [5] K. Paraschidis, N. Fahantidis, V. Vassiliadis, V. Petridis, Z. Doulgeri, L. Petrou and G. Hasapis: “A Robotic System for Handling Textile Materials,” Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.3, pp.1769-1774, 1995.
- [6] 小野栄一, 喜多伸之, 坂根茂幸:“視覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布地の展開”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.2, pp.275-283, 1997.
- [7] 小野栄一:“布のマニピュレーション”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.2, pp.149-153, 1998.
- [8] 蒲谷崇, 柿倉正義:“布地物体のハンドリングに関する研究”, 日本機械学会論文集 64 巻 620 号 C 編, pp.240-245, 1998.
- [9] 濱島京子, 柿倉正義:“布地物体展開手順のプランニング”, 日本機械学会論文集 63 巻 607 号 C 編, pp.333-340, 1997.
- [10] 西村国俊:“紙のハンドリング技術”, 精密工学会誌, vol.55, no.7, pp.1169-1172, 1989.
- [11] 大澤文明, 柿倉正義:“布地物体のハンドリング—摘みと巻き機能を有するロボットハンドによる洗濯物の把握—”, 電気学会システム・制御研究会資料 SC-98-1-10, pp.37-42, 1998.
- [12] 日本工業規格: JIS L 1096 一般織物試験方法, 日本工業標準調査会審議, 1990.



大澤文明 (Fumiaki Osawa)

1967 年 4 月 27 日生。1999 年東京電機大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年、金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻博士後期課程進学、現在に至る。現在、家庭用サービスロボットに関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



柿倉正義 (Masayoshi Kakikura)

1942 年 9 月 4 日生。1965 年東京電機大工電子卒業。同年、電気試験所(現電子技術総合研究所)入所。1980 年情報制御研究室長, 1988 年自律制御システム研究室長。1974~1975 年エジンバラ大学人工知能学科。1990 年東京電機大学工学部電子工学科教授。1986, 1992 年計測自動制御学会論文賞。工学博士(東京工業大学)。(日本ロボット学会正会員)