

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5103589号
(P5103589)

(45) 発行日 平成24年12月19日(2012.12.19)

(24) 登録日 平成24年10月12日(2012.10.12)

(51) Int.Cl.		F I	
B 2 5 J 19/02	(2006.01)	B 2 5 J 19/02	
G 0 6 F 9/50	(2006.01)	G 0 6 F 9/46	4 6 5 Z
B 2 5 J 13/00	(2006.01)	B 2 5 J 13/00	Z
G 0 6 F 13/36	(2006.01)	G 0 6 F 13/36	5 3 0 A

請求項の数 3 (全 33 頁)

(21) 出願番号	特願2007-238747 (P2007-238747)	(73) 特許権者	393031586
(22) 出願日	平成19年9月14日(2007.9.14)		株式会社国際電気通信基礎技術研究所
(65) 公開番号	特開2009-66716 (P2009-66716A)		京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2
(43) 公開日	平成21年4月2日(2009.4.2)	(74) 代理人	100090181
審査請求日	平成22年7月23日(2010.7.23)		弁理士 山田 義人
特許法第30条第1項適用	日本機械学会が主催する「第12回 ロボティクスシンポジウム」(2007年3月15日~3月16日)にて発表	(72) 発明者	宮下 敬宏
(出願人による申告)平成19年4月2日付け、支出負担行為担当官 総務省大臣官房会計課企画官、研究テーマ「ネットワーク・ヒューマン・インターフェースの総合的な研究開発(ネットワークロボットの技術)」に関する委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願			京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内
		(72) 発明者	野田 智之
			京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内
		(72) 発明者	石黒 浩
			京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 コミュニケーションロボット

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

全身に分布された複数の触覚センサエレメントが接続された複数のノードを含む触覚センサおよびホストコンピュータを備えるコミュニケーションロボットであって、

前記複数のノードのそれぞれは、

触覚インタラクション時の前記触覚センサの時系列データを用いて算出された前記複数の触覚センサエレメント間の相互相関を表す特徴ベクトルから部分空間法によって構成されかつ各触覚インタラクションの種類を識別するための識別関数を示す識別関数データ、および認識対象の触覚インタラクションについて前記識別関数の出力の計算のための各触覚センサエレメントの時系列データの転送経路を示す転送経路データを記憶する記憶手段、

所属する各触覚センサエレメントの時系列データを検出する検出手段、

前記転送経路データに基づいて、前記検出手段で検出した前記時系列データを他のノードに送信する第1送信手段、

他のノードの前記各触覚センサエレメントの時系列データを受信する受信手段、

前記検出手段で検出した前記時系列データ、前記受信手段で受信した前記時系列データおよび前記識別関数データに基づいて、認識対象の触覚インタラクションの識別関数の出力を算出する算出手段、および

前記算出手段によって算出された識別関数の出力を前記ホストコンピュータに送信する第2送信手段を備え、

前記ホストコンピュータは、各ノードから受信した前記識別関数の出力に基づいて、触覚インタラクションの識別を行う識別手段を備える、コミュニケーションロボット。

【請求項 2】

前記記憶手段は、前記各触覚センサエレメントの時系列データの転送量を示す転送量データをさらに記憶し、

前記第 1 送信手段は、前記時系列データを前記転送量データの転送量で送信する、請求項 1 記載のコミュニケーションロボット。

【請求項 3】

請求項 1 記載のコミュニケーションロボットのための前記識別関数の作成方法であって、

- (a) 触覚インタラクション時の前記触覚センサの時系列データを蓄積し、
- (b) 前記触覚センサの時系列データを用いて算出された前記複数の触覚センサエレメント間の相互相関を表す特徴ベクトルを算出し、そして
- (c) 前記特徴ベクトルから部分空間法により各触覚インタラクションの識別関数を構成する、触覚インタラクションの識別関数の作成方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明はコミュニケーションロボットに関し、特にたとえば、全身に分布された複数の触覚センサエレメントを備えるコミュニケーションロボットに関する。また、この発明は、そのようなコミュニケーションロボットのための触覚インタラクションの識別関数の作成方法に関する。

【背景技術】

【0002】

人とのコミュニケーションを目指すロボットにとって、全身を柔らかい素材で構成された皮膚と敏感な触覚で覆うことは、接触によって危害を加える危険性を減少させるという点で重要な要素の 1 つとなるだけでなく、ロボットと人間とが円滑にコミュニケーションを行うためには、全身分布型の高感度超柔軟性触覚センサに基づく触行動認識が必要不可欠になる。

【0003】

これまでのロボットの触覚に関する研究は、物体の把持や操りに関するものが多く、全身に高密度で柔軟な触覚センサエレメントが分布することで引き起こされる技術的な困難さはあまり考慮されてこなかった。触覚センサエレメントの配線や実装に起因する問題だけではなく、第 1 に高密度化に伴うシステムの故障率の増加、第 2 にセンサエレメントの高密度化に伴う情報量の増加、第 3 にセンサエレメントの管理が困難になるという、3 つの課題が生まれてくる。

【0004】

本出願人は、コミュニケーションロボットの全身触覚の実現を目指し、第 1 の課題の断線やノードの故障に柔軟に対応できる自己組織化可能なセンサネットワークを提案した（たとえば特許文献 1 参照）。ネットワークのノードは複数の触覚センサエレメントとセンサ値読み取り装置および演算装置から構成され、それらを相互接続することで、触覚情報に対して継ぎ目のない分散処理が可能であり、これにより第 2 の課題を解決できる。

【特許文献 1】特開 2006 - 287520 号公報 [H04L 12/56, G06F 13/36]

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、このような分散処理を行うには、人間が実際に起こる触覚インタラクションを予見して、その情報を分散処理できるようなプログラムを各ノードに記述する必要がある。その記述自体が困難であるばかりか、自由度をもつロボットの体表面相対位置は変化するため、どのセンサの組み合わせで分散処理を行えばよいかを決定することはでき

10

20

30

40

50

ない。したがって、第3の課題としての大量の触覚センサエレメントの管理方法が、ロボットの全身分布触覚には特有の問題となる。

【0006】

それゆえに、この発明の主たる目的は、新規な、コミュニケーションロボット、および触覚インタラクションの識別関数の作成方法を提供することである。

【0007】

この発明の他の目的は、触覚情報の分散処理を実現できる、コミュニケーションロボット、およびそのようなコミュニケーションロボットのための触覚インタラクションの識別関数の作成方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明は、上記の課題を解決するために、以下の構成を採用した。なお、括弧内の参照符号および補足説明等は、本発明の理解を助けるために後述する実施の形態との対応関係を示したものであって、本発明を何ら限定するものではない。

【0009】

第1の発明は、全身に分布された複数の触覚センサエレメントが接続された複数のノードを含む触覚センサおよびホストコンピュータを備えるコミュニケーションロボットであって、複数のノードのそれぞれは、触覚インタラクション時の触覚センサの時系列データを用いて算出された複数の触覚センサエレメント間の相互相関を表す特徴ベクトルから部分空間法によって構成されかつ各触覚インタラクションの種類を識別するための識別関数を示す識別関数データ、および認識対象の触覚インタラクションについて識別関数の出力の計算のための各触覚センサエレメントの時系列データの転送経路を示す転送経路データを記憶する記憶手段、所属する各触覚センサエレメントの時系列データを検出する検出手段、転送経路データに基づいて、検出手段で検出した時系列データを他のノードに送信する第1送信手段、他のノードの各触覚センサエレメントの時系列データを受信する受信手段、検出手段で検出した時系列データ、受信手段で受信した時系列データおよび識別関数データに基づいて、認識対象の触覚インタラクションの識別関数の出力を算出する算出手段、および算出手段によって算出された識別関数の出力をホストコンピュータに送信する第2送信手段を備え、ホストコンピュータは、各ノードから受信した識別関数の出力に基づいて、触覚インタラクションの識別を行う識別手段を備える、コミュニケーションロボットである。

【0010】

第1の発明では、コミュニケーションロボット(10)は、全身分布型の触覚センサ(76)およびホストコンピュータ(60)を含む。触覚センサは、複数の触覚センサエレメント(58)が接続される複数のノード(80)を含み、つまり、センサネットワークを構成している。各ノードは、記憶手段(プロセッサユニット86の内蔵メモリ)を備えており、この記憶手段には、少なくとも識別関数データおよび転送経路データが記憶される。識別関数データは、各触覚インタラクションの識別関数を示すデータであり、実施例の近似識別関数テーブルDF*または識別関数テーブルDFに対応する。各触覚インタラクションの識別関数は、触覚インタラクション時の触覚センサの時系列データを用いて算出された複数の触覚センサエレメント間の特徴ベクトルから部分空間法によって構成される。また、転送経路データは、認識対象の触覚インタラクションについて識別関数の出力の計算のための各触覚センサエレメントの時系列データの転送経路を示す。つまり、この転送経路データでは、各触覚センサエレメントの時系列データをどの経路で通信してどのノードに集めるかが示されている。各ノードでは、検出手段(86、88、90、S407)により、当該ノードに所属する各触覚センサエレメントの時系列データを検出する。そして、第1送信手段(86、S409、S503)により、転送経路データに基づいて、各触覚センサエレメントの時系列データを他のノードに送信する。これに応じて、各ノードでは、受信手段(86、S409、S507)により、他のノードの触覚センサエレメントの時系列データを受信できる。したがって、各ノードでは、算出手段(86、S4

10

20

30

40

50

15、S417)により、検出手段で検出した当該ノードに所属する触覚センサエレメントの時系列データ、受信手段で受信した他のノードに所属する触覚センサエレメントの時系列データ、および識別関数データに基づいて、認識対象の触覚インタラクションの識別関数の出力を算出することができる。算出された識別関数の出力は、第2送信手段(86、S419)により、ホストコンピュータに送信される。したがって、ホストコンピュータは、各ノードからの識別関数の出力を受信して、識別手段(60、S319-S325)により、触覚インタラクションの識別を行うことができ、具体的には、認識対象の触覚インタラクションが行われたのか、あるいは予期しない入力があったのか等を認識することができる。

【0011】

第1の発明によれば、各ノードに識別関数データおよび転送経路データを記憶しているので、転送経路データに基づいて触覚センサエレメントの時系列データをノード間で送受信することによって、各ノードで触覚インタラクションの識別関数の出力を算出することができる。そして、ホストコンピュータで、各ノードからの識別関数の出力に基づいて、触覚インタラクションの識別を行うことができる。このように、各ノードにおいて触覚情報の分散処理を実行して、触覚インタラクションの識別を行うことができる。

【0012】

第2の発明は、第1の発明に従属するコミュニケーションロボットであって、記憶手段は、各触覚センサエレメントの時系列データの転送量を示す転送量データをさらに記憶し、第1送信手段は、時系列データを転送量データの転送量で送信する。

【0013】

第2の発明では、記憶手段には、転送量データがさらに記憶されている。転送量データは、各触覚センサエレメントの時系列データの転送量を示し、これはネットワーク帯域の許容範囲内に収められている。第1送信手段により、転送量データに示された転送量を有する時系列データが他のノードに送信される。したがって、各ノードでの識別関数の出力の計算に必要な触覚センサエレメントの時系列データのノード間の通信を、許容範囲内の転送量で実行することができ、分散処理を実行する際の通信負荷を適切に抑制することができる。

【0014】

第3の発明は、第1発明のコミュニケーションロボットのための前記識別関数の作成方法であって、(a)触覚インタラクション時の触覚センサの時系列データを蓄積し、(b)前記触覚センサの時系列データを用いて算出された前記複数の触覚センサエレメント間の相互相関を表す特徴ベクトルを算出し、そして(c)前記特徴ベクトルから部分空間法により各触覚インタラクションの識別関数を構成する、触覚インタラクションの識別関数の作成方法である。

【0015】

第3の発明によれば、触覚センサエレメントの時系列データから触覚インタラクションを識別可能にする識別関数を作成することができる。

【発明の効果】

【0016】

この発明によれば、人間との触覚インタラクション時の触覚センサの時系列データから部分空間法により構成された各触覚インタラクションの識別関数が各ノードに記憶されるので、各ノードで識別関数の出力を算出することができ、そして、ホストコンピュータで触覚インタラクションの識別を行うことができる。したがって、複数の触覚センサエレメントで全身を覆われたコミュニケーションロボットにおいて、触覚情報の分散処理を実現することができる。

【0017】

また、部分空間法により触覚インタラクション時の触覚センサの時系列データから触覚インタラクションの識別関数を構成することができるので、触覚情報の分散処理を行えるコミュニケーションロボットを実現できる。

10

20

30

40

50

【0018】

この発明の上述の目的、その他の目的、特徴および利点は、図面を参照して行う以下の実施例の詳細な説明から一層明らかとなる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

図1は、この発明の実施例のコミュニケーションロボット（以下、単に「ロボット」ともいう。）10を示す。ロボット10は台車12を含み、この台車12の側面には、このロボット10を自律移動させる車輪14が設けられる。この車輪14は、車輪モータ（図3において参照番号「16」で示す。）によって駆動され、台車12すなわちロボット10を前後左右任意の方向に動かすことができる。なお、図示しないが、この台車12の前

10

【0020】

面には、衝突センサが取り付けられ、この衝突センサは、台車12への人間や他の障害物の接触を検知する。

台車12の上には、多角形柱状のセンサ取付パネル18が設けられ、このセンサ取付パネル18の各面には、超音波距離センサ20が取り付けられる。この実施例ではたとえば24個の超音波距離センサ20が周囲360度にわたるように設けられる。この超音波距離センサ20は、センサ取付パネル18すなわちロボット10の周囲の主として人間との距離を計測するものである。具体的には、超音波距離センサ20は超音波を発射し、その超音波が人から反射されて超音波距離センサ20に入射されたタイミングを測定して、人との間の距離情報を出力する。

20

【0021】

台車12の上には、人体状部22が直立するように取り付けられる。このロボット本体としての人体状部22の全身は、後に詳しく説明するように、柔軟素材からなる皮膚24によって覆われる。人体状部22は、たとえば鉄板のような筐体（図示せず）を含み、その筐体にコンピュータやその他必要なコンポーネントを収容している。そして、皮膚24は、その筐体上に被せられる。皮膚24の下の筐体の上部ほぼ中央にはマイク26が設けられる。このマイク26は、周囲の音声、特に人間の声を収集するためのものである。

【0022】

人体状部22は、右腕28Rおよび左腕28Lを含み、右腕28Rおよび左腕28Lすなわち上腕30Rおよび30Lは、それぞれ、肩関節32Rおよび32Lによって、胴体部分に変位自在に取り付けられる。この肩関節32Rおよび32Lは、3軸の自由度を有する。上腕30Rおよび30Lには、1軸の肘関節34Rおよび34Lによって、前腕36Rおよび36Lが取り付けられ、この前腕36Rおよび36Lには、手38Rおよび38Lが取り付けられる。これら右腕28Rおよび左腕28Lの各関節における各軸はここでは図示しないモータによってそれぞれ制御される。すなわち、右腕28Rおよび左腕28Lのそれぞれ4個のモータが、図3において、それぞれ右腕モータ40および左腕モータ42として表される。

30

【0023】

人体状部22の上部には首関節44を介して頭部46が、人間の頭と同様に俯仰・回転可能に取り付けられる。この3軸の首関節44は、図3に示す頭部モータ48によって制御される。頭部46の前面の「目」に相当する位置には2つの眼カメラ50が設けられ、この眼カメラ50は、ロボット10に接近した人間の顔や他の部分を撮影してその映像信号を取り込む。頭部46の前面の目カメラ50の下方にはスピーカ52が設けられる。このスピーカ52は、ロボット10がその周囲の人間に対して音声によってコミュニケーションを図るために用いられる。

40

【0024】

上で説明した人体状部22の胴体や頭部46および腕は上記したようにすべて柔軟な素材からなる皮膚24に覆われる。この皮膚24は、図2に示すように、下層のウレタンフォーム54と、その上に積層される比較的肉厚のシリコンゴム層56aおよび比較的肉薄のシリコンゴム層56bとを含む。そして、2つのシリコンゴム層56aおよび5

50

6 bの間に、 piezo センサシート 5 8 が埋め込まれる。この piezo センサシート 5 8 は、圧電フィルム（たとえば P V D F（ポリビニリデンフルオロイド））の両面に金属薄膜が形成された構造、つまり、圧電体が導体で挟まれた構造を有する圧電センサである。piezo フィルムは、圧力等で変形されると、両面金属薄膜間に piezo 電気を発生し、すなわち、そのひずみ速度に応じた電圧を発生する。piezo フィルムは、たとえば、3 0 × 3 0 m m 程度の大きさにカットされ、約 5 m m の間隔で皮膚 2 4 中に配置される。

【 0 0 2 5 】

皮膚 2 4 では、上述のように、発泡ウレタンとシリコーンゴムとを使って柔らかさを得るようにしている。シリコーンゴムだけである程度の厚みと柔らかさとを得ようとすると、重くなりすぎてエネルギー消費量が大きくなるだけでなく、裂傷に弱くなるので、大まかな形と厚みをウレタンフォームで作し、その表面を約 2 0 m m のシリコーンゴムで覆う形が採用されている。そして、シリコーンゴム層を 2 つにし、それらのシリコーンゴム層 5 6 a および 5 6 b の間に、上述の piezo センサシート 5 8 が埋め込まれる。さらに、内側のシリコーンゴム層 5 6 a が厚く（約 1 5 m m）され、表面側のシリコーンゴム層 5 6 b が薄く（約 5 m m）される。これによって、ロボット 1 0 の振動や人間が表面を押したときに生じる高周波の振動をカットでき、なおかつフィルムが変形し易くなるので、圧力の計測が容易になる。つまり、シリコーンゴム層の厚みはロボット 1 0 の構造やパワーによるが、なるべく薄く、しかし変形が伝わり易く、雑音となる振動が伝わり難いものが必要となる。また、この柔らかい皮膚を介して、人との間で触行動によるコミュニケーションを行うことができるので、人に対して安心感を与えて親和性を高めることができるし、触れたりぶつかったりした場合の人の怪我を防止して安全性も高めることができる。

【 0 0 2 6 】

なお、皮膚 2 4 の素材は軟性素材であればよく、上述のものに限定されずたとえば他のゴム素材等でもよい。ただし、piezo センサシートの表面金属薄膜が腐食しない材質である必要がある。また、上述の皮膚 2 4 の厚み（各層の厚み）は一例であり、素材等によって適宜変更され得る。また、皮膚 2 4 の積層構造も適宜変更可能である。

【 0 0 2 7 】

このように、人体状部 2 2 の全身にわたって多数の piezo センサシート（触覚センサエレメント）5 8 が埋め込まれており、全身分布型の高密度で超柔軟の触覚センサ（図 3 において参照符号「7 6」で示す。）が構築されている。後述するように、触覚センサ 7 6 は、複数のノード 8 0（図 4 参照）を含むセンサネットワークで構成されており、各ノード 8 0 は、複数の触覚センサエレメント 5 8、センサ値読取装置および演算装置等を備えている。この触覚センサ 7 6 によって、ロボット 1 0 の全身において人間や物の接触によって皮膚 2 4 に加えられた圧力を圧覚（触覚）情報として検知することができる。

【 0 0 2 8 】

図 1 に示すロボット 1 0 の電氣的構成の一例が図 3 のブロック図に示される。図 3 に示すように、このロボット 1 0 は、全体の制御のためにマイクロコンピュータまたは CPU 6 0 を含み、この CPU 6 0 には、バス 6 2 を通して、メモリ 6 4、モータ制御ボード 6 6、センサ入力/出力ボード 6 8 およびサウンド入力/出力ボード 7 0 が接続される。

【 0 0 2 9 】

メモリ 6 4 は、図示しないが、ROM や HDD、RAM 等を含む。ROM や HDD 等にはこのロボット 1 0 の制御プログラムが予め書き込まれている。制御プログラムはたとえばコミュニケーション行動を実行するためのプログラム、外部のコンピュータと通信するためのプログラム等を含む。メモリ 6 4 にはまた、コミュニケーション行動を実行するためのデータが記憶され、そのデータは、たとえば、個々の行動を実行する際に、スピーカ 5 2 から発生すべき音声または声の音声データ（音声合成データ）、および所定の身振りを提示するための各関節軸の角度制御データ等を含む。RAM は、一時記憶メモリおよびワーキングメモリとして利用される。

【 0 0 3 0 】

モータ制御ボード 6 6 は、たとえば DSP (Digital Signal Processor) で構成され、各

10

20

30

40

50

腕や頭部などの各軸モータを制御する。すなわち、モータ制御ボード66は、CPU60からの制御データを受け、右肩関節32Rの3軸のそれぞれの角度を制御する3つのモータと右肘関節34Rの1軸の角度を制御する1つのモータとの計4つのモータ(図3ではまとめて、「右腕モータ」として示す。)40の回転角度を調節する。また、モータ制御ボード66は、左肩関節32Lの3軸と左肘関節34Lの1軸、計4つのモータ(図3ではまとめて、「左腕モータ」として示す。)42の回転角度を調節する。モータ制御ボード66は、また、頭部46を変位させる首関節44の3軸のモータ(図3ではまとめて、「頭部モータ」として示す。)48の回転角度を調節する。そして、モータ制御ボード66は、車輪14を駆動する2つのモータ(図3ではまとめて、「車輪モータ」として示す。)16を制御する。

10

【0031】

なお、この実施例の上述のモータは、車輪モータ16を除いて、制御を簡単化するためにそれぞれステップモータまたはパルスモータであるが、車輪モータ16と同様に、直流モータであってよい。

【0032】

センサ入力/出力ボード68も、同様に、DSPで構成され、各センサやカメラからの信号を取り込んでCPU60に与える。すなわち、図示しない衝突センサの各々からの接触に関するデータがこのセンサ入力/出力ボード68を通して、CPU60に入力される。また、眼カメラ50からの映像信号が、必要に応じてこのセンサ入力/出力ボード68で所定の処理が施された後、CPU60に入力される。

20

【0033】

また、触覚センサ76が、このセンサ入力/出力ボード68に接続されており、CPU60と触覚センサ76はセンサ入力/出力ボード68を介してデータを送受信する。

【0034】

サウンド入力/出力ボード70には、スピーカ52およびマイク26が接続される。スピーカ52にはサウンド入力/出力ボード70を介して、CPU60から、合成音声データが与えられ、それに従って、スピーカ52からはそのデータに従った音声または声が出力される。また、マイク26からの音声入力が、サウンド入力/出力ボード70を介して、CPU60に取り込まれる。

【0035】

また、CPU60には、バス62を介して通信LANボード72および無線通信装置74が接続される。この通信LANボード72および無線通信装置74によって、ロボット10は外部のコンピュータ等と無線通信を行うことができる。具体的には、通信LANボード72は、DSPで構成され、CPU60からの送信データを無線通信装置74に与え、無線通信装置74から送信データを、図示は省略するが、たとえば無線LANまたはインターネットのようなネットワークを介して、外部のコンピュータに送信させる。また、通信LANボード72は、無線通信装置74を介して外部のコンピュータからのデータを受信し、受信したデータをCPU60に与える。

30

【0036】

さらに、CPU60には、バス62を介して触覚インタラクシオンデータベース78が接続される。この触覚インタラクシオンデータベース78には、ロボット10と人間との間で行われた触覚インタラクシオンの際に触覚センサ76によって検出されたセンサ時系列データ等が記憶されている。触覚インタラクシオンデータベース78のデータを元に、触覚インタラクシオンの識別器や分散処理のための情報が作成される。触覚インタラクシオンデータベース78は、後述のように実験により構築される。

40

【0037】

触覚センサ76の電氣的構成の一例が図4のブロック図に示される。触覚センサ76は複数のノード80を含み、各ノード80は複数の触覚センサエレメント58を備えている。複数のノード80はバス82を介して相互に接続される。バス82はたとえばRS422シリアルバスであり、センサ入力/出力ボード68に設けられるシリアル通信ポートに

50

接続されている。このように、複数のノード 80 および CPU 60 がセンサネットワークを構成しており、接続された経路を介して通信を行う。

【0038】

なお、触覚センサ 76 のネットワーク構造は適宜変更可能であり、たとえば、本出願人による上述の特開 2006 - 287520 号公報に開示されるような相互接続型のセンサネットワークが構築されてもよい。

【0039】

各ノード 80 は基板 84 を含み、この基板 84 に当該ノード 80 に所属する複数の触覚センサエレメント 58 が接続される。また、基板 84 には、センサ値読取装置としての A/D 変換器 88 および増幅器 90、ならびに演算装置としてのプロセッサユニット 86 が設けられている。各触覚センサエレメント 58 からの配線は増幅器 90 に接続されている。

【0040】

なお、基板 84 と所属する各触覚センサエレメント 58 との配線長を短くするために、各ノード 80 の基板 84 は、所属する各触覚センサエレメント 58 のなるべく近傍になるように筐体内において配置される。たとえば、200 - 300 枚程度の触覚センサエレメント 58 がロボット 10 の全身の皮膚 24 中に分布されており、また、十数枚程度の基板 84 が設けられる。各基板 84 には数十枚程度の触覚センサエレメント 58 が割り当てられる。

【0041】

各触覚センサエレメント 58 の出力信号は、増幅器 90 で電流増幅された後、A/D 変換器 88 によってデジタルデータに変換される。この A/D 変換器 88 は、たとえば 16 bit、100 Hz の時空間分解能でサンプリングを行う。A/D 変換器 88 でサンプリングされたデータはプロセッサユニット 86 に与えられる。

【0042】

プロセッサユニット 86 は、ノードプロセッサであり、つまり、当該ノード 80 の制御および通信制御を行うマイクロコンピュータである。プロセッサユニット 86 は、ROM および RAM などのメモリを内蔵している。内蔵メモリの ROM にはノード 80 の動作を制御するためのプログラムおよびデータが予め記憶される。A/D 変換器 88 で読み取られた各触覚センサエレメント 58 のセンサ出力データ（時系列データ）は、内蔵メモリの RAM に記憶される。このプロセッサユニット 86 により、センサ時系列データの処理を各ノード 80 において行うことができる。また、このプロセッサユニット 86 が上述のバス 82 に接続されており、他のノード 80 のプロセッサユニット 86 および CPU 60 との間で通信を行う。

【0043】

このような全身分布型触覚センサ 76 を有するロボット 10 における大量の触覚センサエレメント 58 の管理という課題に対し、本発明者らは、認識に必要なセンサに注目するための手法を発明した。本手法では、ロボット 10 と人間とのコミュニケーションのうち、人間の触行動を伴う触覚インタラクションの際の触覚センサ 76 の時系列データを記録し、全センサ間の時系列出力から相関値を算出し、これらを特徴空間とした触覚インタラクションの識別器を構成する。この識別器の出力に有用な部分空間を取り出すことで、各触覚インタラクション識別に有用なセンサの組み合わせを決定することができる。これを、触覚インタラクションに基づく触覚センサエレメントの自己組織化と呼ぶ。

【0044】

識別器の構成には、部分空間法の 1 つである CLAFIC 法 (CLAss-Featuring Information Compression) を用いる。CLAFIC 法は、各クラスの特徴データの KL 展開よりクラスごとの部分空間を作成し、その各部分空間に特徴ベクトルを写像し、写像後のノルムが最大になる部分空間を構成するクラスを識別結果として出力する手法である。もともとこの手法は、1960 年代に Watanabe らが、多数の特徴ベクトルを多次元の特徴空間の中にプロットすると、多くの場合小さな部分空間の中に偏って分布することに着目した [

10

20

30

40

50

渡辺慧, “認識とパタン”, (岩波新書), 岩波書店, 1986(絶版)] ことに始まる。相互相関マトリクスの上三角部分より構成する特徴空間は、触覚センサエレメント数を N とすると $O(N^2)$ の超多次元の特徴空間となるため、この場合も特徴ベクトルが小さな部分空間の中に偏って分布することが予想できる。つまり、その小さな部分空間に注目して識別器を構成することによってデータの次元圧縮が期待できる。

【0045】

本手法ではさらに、選択した正規直交ベクトルと特徴空間の基底ベクトルとの内積が大きいもののみを選択することによりさらなる次元圧縮を試みる。最終的に次元圧縮された空間は、もとの特徴ベクトルを張る基底ベクトルの一部の線形結合和で表せる部分空間となる。その部分空間で構成される識別器の出力は、絶対値の大きい各成分の行と列にあたるセンサエレメント出力のみから近似的に計算可能となる。その組み合わせから分散処理におけるセンサエレメントの境界を決定することができる。

10

【0046】

識別器の特徴空間は、相互相関マトリクスの上三角行列部分をベクトル化したものを用いる。つまり、特徴ベクトル a は、 N 個ある触覚センサエレメントのうち (i, j) 間の相互相関係数 R_{ij} ($i < j$, 対称成分を除く上三角行列部分) より次の数 1 のように定義される。

【0047】

【数 1】

$$a = \left(\underbrace{R_{(1,2)}, \dots, R_{(1,N)}}_{N-1}, \underbrace{R_{(2,3)}, \dots, R_{(2,N)}}_{N-2}, \dots, \underbrace{R_{(N-1,N)}}_1 \right)^t$$

20

【0048】

なお、 P 個のセンサエレメントが、ある等間隔の離散時間でサンプリングされ、 i 番目の離散時系列データベクトルとして S_i ($i = 1, \dots, P$) が得られたとする。このとき、 i 番目と j 番目のセンサの相互相関係数 R_{ij} は共分散を $C_{ij}(S_i, S_j)$ とすると次の数 2 で求められる。

【0049】

【数 2】

$$R_{ij}(S_i, S_j) = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii}C_{jj}}} \quad (-1 \leq R_{ij} \leq 1)$$

30

【0050】

特徴ベクトル a に触覚インタラクションのクラス (種類) c (これを c と表す) を関連づけ、それを列成分として並べたデータセットを X_c として準備する。部分空間法より構成される任意のクラスの識別関数は、データセット X を次の数 3 のように特異値分解した結果を用いることができる。

【0051】

【数 3】

$$X = UD_\lambda V^t$$

40

【0052】

ここで、 U は正規直交ベクトル u_1, u_2, \dots, u_r を並べた行列であり、左特異ベクトルと呼ばれ、 KL 展開で求まる各固有値に対応する固有ベクトルに相当する。 V は右特異ベクトル、 D は特異値 d_1, \dots, d_r を対角要素にもつ対角行列である。

【0053】

これより未知ベクトル x に対する各クラスの識別関数出力 $DF_i(x)$ は、正規直交ベクトル u_{ij} を特異値の大きいものから順に d_1, d_2, \dots, d_i まで採用し、次の数 4 のよう

50

に表すことができる。

【 0 0 5 4 】

【 数 4 】

$$DF_i(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{d_i} (\mathbf{x}' \mathbf{u}_{ij})^2$$

【 0 0 5 5 】

ここで、 d_i は累積寄与率に関する閾値 C_1 をもとに決定する。つまり、閾値 C_1 により、部分空間を構成するベクトルの上位何番目までを採用するかが決められる。

10

【 0 0 5 6 】

本手法では、さらにリジェクト領域を導入する方法としてWatanabeらのいう忠実度を用いた基準を多クラス問題に拡張して導入し、次の数5の関係式が成り立たない場合には、どのクラスにも属さないリジェクトと判定する。つまり、各クラスの識別関数出力のうちクラス l が最大であるとき、

【 0 0 5 7 】

【 数 5 】

$$\frac{DF_l(\mathbf{x})}{\max_{k \neq l} (DF_k(\mathbf{x}))} > 1/\tau$$

20

【 0 0 5 8 】

上述のように導出した識別関数から特徴空間を構成する基底のうち、出力に有用な部分空間を決定する。これは、識別関数により基底の重みが表されている点に注目した、Ishiguroら [Hiroshi Ishiguro, Masatoshi Kamiharako and Toru Ishida, "State Space Construction by Attention Control", International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99), pp. 1131-1137, 1999.] のいうアテンションコントロールと共通している。

【 0 0 5 9 】

u_{ij} の p 番目の成分 $(u_{ij})_p$ がほぼ0である場合に、 $(u_{ij})_p = 0$ とした新たなベクトル \tilde{u}_{ij} を作る。すなわち、0に十分近い適当な閾値 C_2 を決め、絶対値が C_2 より小さい u_{ij} の成分を0とした新たなベクトル u_{ij}^* を作る。ただし、次の数6の関係が成立する。この閾値 C_2 により、どの触覚センサエレメントの組に注目するかが決められる。

【 0 0 6 0 】

【 数 6 】

$$\mathbf{u}_{ij}^* = \tilde{\mathbf{u}}_{ij} / \|\tilde{\mathbf{u}}_{ij}\|$$

40

【 0 0 6 1 】

この u_{ij}^* に対して、 u_{ij}^* の正規直交性 (数7) を近似的に仮定する。

【 0 0 6 2 】

【 数 7 】

$$\mathbf{u}_{ij}^{*t} \mathbf{u}_{il}^* \cong \delta_{kl}$$

【 0 0 6 3 】

識別関数 $DF_i^*(\mathbf{x})$ は最終的に次の数8で表される。

【 0 0 6 4 】

50

【数 8】

$$DF_i^*(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{d_i} (\mathbf{x}^t \mathbf{u}_{ij}^*)^2$$

【0065】

最終的な識別関数である $DF_i^*(\mathbf{x})$ は、数 8 より、未知のベクトル \mathbf{x} と \mathbf{u}_{ij}^* の内積の形をしている。そのため、この内積を求めるには \mathbf{x} の成分のうち、 \mathbf{u}_{ij}^* の 0 以外の成分に対応する $x_p, \{p | (\mathbf{u}_{ij}^*)_p \neq 0\}$ を知ることができればよい。未知パターン \mathbf{x} を特徴ベクトルで表したときのベクトルの成分は、数 1 で定義したように相互相

10

【0066】

【数 9】

$$\mathbf{x} = (\mathbf{R}_{(1,2)}, \mathbf{R}_{(1,3)}, \dots, \mathbf{R}_{(N-1,N)})$$

【0067】

その相互相関マトリクスの成分が $R(r_q, s_q)$ であるので、そのときの行と列の番号の組 (r_q, s_q) を順番に並べていくと、相互相関を求めるために必要になるセンサエレメント

20

出力の組となる。

【0068】

この N_i 組のセンサエレメント出力 (S_{r_q}, S_{s_q}) の相互相関係数が実際に識別関数 $DF_i^*(\mathbf{x})$ の出力に関係する成分であり、この成分が計算できるような N_i 個の相互相関マトリクスの成分を計算するだけでよいことになる。ただし、 i は各クラス $1, 2, \dots, c$ に対応しており、 $N_i = D = (N-1)N/2$, $r = (r_0, r_1, \dots, r_{N_i})$, $s = (s_0, s_1, \dots, s_{N_i})$ である。

【0069】

この組み合わせに入っていないセンサエレメントと入っているセンサエレメントの間で、識別に使うかどうかの境界が引ける。以上の定式化を実際のセンサエレメント出力に適用することによって、識別に必要なセンサエレメントを決定することができる。

30

【0070】

本手法を適用する触覚インタラクションデータベース 78 は、ロボット 10 と人間との間のコミュニケーション実験により構築される。実験では、人間の触行動を伴う様々なコミュニケーションを人間とロボット 10 との間で行わせ、そのような触覚インタラクションごとの触覚センサ 76 のセンサ時系列データを記録する。

【0071】

具体的には、この実施例のような全身の体表が柔軟な皮膚 24 で覆われており人間が安全に触ることのできるロボット 10 に対しては、人間は様々な触行動を行う。このロボット 10 を大阪市立科学館に展示し来館者にロボット 10 と自由に遊んでもらう実験では、頭をなでる、抱っこする、ロボット 10 を触るといような触行動を伴う触覚インタラクションが観察された。この実験で観察されたインタラクションを元に、統制実験のためのシナリオを準備した。シナリオの各ステップではロボット 10 が対面する相手に触行動を促すための働き掛けを行い、被験者の触行動が終わった段階で次のステップに進むというルールから成っている。このルールをもとにロボット 10 を W O Z (Wizard of OZ) 法によって制御する。つまり、オペレータがロボット 10 の行動の遷移を遠隔制御する。具体的には、シナリオおよびルールに従ってオペレータが外部コンピュータを操作することによって、外部コンピュータがロボット 10 に各ステップの行動(働き掛け)の実行コマンドを送信する。当該コマンドの受信に応じて、ロボット 10 が当該コマンドに対応する行動を行うためのプログラムを実行する。これによって、ロボット 10 が音声および身振り

40

50

の少なくとも一方を用いて当該行動を実行し、それに応じた人間のロボット10に対する行動が期待されるので、そのような触覚インタラクションを触覚センサ76によって計測する。

【0072】

シナリオの一例が図5に示されている。この図5のシナリオをもとにロボット10と人間をインタラクションさせることにより、15種類の働き掛けに対応する触覚コミュニケーションが時系列順にクラス1からクラス15として観察されることが期待できる。

【0073】

図5のシナリオを簡単に説明すると、まず、ステップS1で、ロボット10は振り向く行動を実行し、人間に顔を向ける。次に、ステップS3で、「こんにちは」行動を実行し、つまり、「こんにちは」と発話する。この働き掛けに対する触覚インタラクションがクラス1であり、触覚センサ76のセンサ時系列データがクラス1に対応付けて触覚インタラクションデータベース78に記憶される。

10

【0074】

続いて、ステップS5で、「握手してね」行動を実行し、つまり、「握手してね」と発話し右手を前に差し出す。これに対しては、人間の触行動すなわち握手が期待できる。この「握手してね」に対応する触覚インタラクションがクラス2である。人間が握手してくれない場合には、オペレータは、ステップS7で“NO”と判断する。したがって、ステップS9の「どうしてしてくれないの？」の発話を実行してから、再びステップS5の「握手してね」行動を実行する。人間が握手してくれるまでこれを繰り返す。人間が握手してくれた場合には、その触行動のセンサ時系列データがクラス2に対応付けて記憶される。

20

【0075】

続いて、ステップS11で「よろしくね」行動を実行し、つまり、「よろしくね」と発話する。これに対する触覚インタラクションがクラス3であり、触覚センサ76のセンサ時系列データがクラス3に対応付けて記憶される。続くステップS13で「あなたの名前は」行動を実行し、つまり、「あなたの名前は」と発話する。これに対する触覚インタラクションがクラス4である。人間が名前を答えてくれない場合には、オペレータはステップS15で“NO”と判断し、答えがあるまでステップS13の「あなたの名前は」行動を繰り返す。人間が名前を答えてくれた場合には、そのときの触覚センサ76のセンサ時系列データがクラス4に対応付けて記憶される。

30

【0076】

続いて、ステップS17で「どこから来たの」行動を実行し、つまり、「どこから来たの」と発話する。これに対する触覚センサ76のセンサ時系列データがクラス5に対応付けて記憶される。

【0077】

続くステップS19では、「遊ぼうよ」行動を実行し、つまり、「遊ぼうよ」と発話する。これに対する触覚インタラクションがクラス6である。この「遊ぼうよ」に対して、たとえば「遊ぼうね」などの肯定的な反応を人間がしない場合には、オペレータは、ステップS21で“NO”と判断する。したがって、ステップS23の「どうして」の発話を実行してから、ステップS19の「遊ぼうよ」を実行する。人間が肯定的な反応を返すまでこれを繰り返す。人間が肯定的な反応をしてくれた場合、そのときのセンサ時系列データがクラス6に対応付けて記憶される。

40

【0078】

続いて、ステップS25で「かわいいかなあ」行動を実行し、つまり、「かわいいかなあ」と発話する。これに対する触覚インタラクションがクラス7であり、人間が「かわいいよ」などの肯定的な反応をしてくれた場合には、そのときのセンサ時系列データがクラス7に対応付けて記憶される。

【0079】

そして、オペレータはステップS27で“YES”と判断する。したがって、ステップS29で「よしよししてほしいな」行動を実行し、つまり、「よしよししてほしいな」と

50

発話する。これに対しては、典型的には人間がロボット10の頭部46を撫でるような触行動が期待できる。この触覚インタラクションがクラス8であり、そのセンサ時系列データがクラス8に対応付けて記憶される。

【0080】

ステップS29で人間が触行動をしてくれた場合、オペレータはステップS31で“YES”と判断する。したがって、ステップS33で「わーいわーい」行動を実行し、つまり、「わーいわーい」と発話して喜びを表現する。これに対する触覚インタラクションがクラス9であり、そのセンサ時系列データがクラス9に対応付けて記憶される。

【0081】

なお、ステップS25の「かわいいかなあ」行動に対して「かわいくない」などの否定的な発話や叩くなどの行動があったりした場合には、オペレータはステップS27で“NO”と判断し、ステップS35の「どうして」の発話を実行する。そして、ステップS37の「えーんえーん」の発話（泣く振り）を実行する。また、ステップS29の「よしよししてほしいな」行動に対する触行動が行われず、ステップS31で“NO”と判断される場合にも、ステップS37の「えーんえーん」と泣き声を発して悲しみを表現する。

【0082】

続いて、ステップS39で「もっと遊びたいなあ」行動を実行し、つまり、「もっと遊びたいなあ」と発話する。これに対する触覚インタラクションがクラス10であり、そのセンサ時系列データがクラス10に対応付けて記憶される。

【0083】

続くステップS41では、「ちょちょしてほしいな」行動を実行し、つまり、「ちょちょしてほしいな」と発話するとともに、両腕を動かして脇を開ける。これに対しては、典型的には人間がロボット10の脇などをくすぐるような触行動が期待できる。この触覚インタラクションがクラス11であり、そのセンサ時系列データがクラス11に対応付けて記憶される。

【0084】

なお、人間がロボット10に対して「ちょちょ」に対応する触行動をしてくれない場合には、オペレータはステップS43で“NO”と判断する。したがって、ステップS45で「どうしてくれないの」の発話を実行してから、ステップS41の「ちょちょしてほしいな」を再び実行する。人間が触行動を返すまでこれを繰り返す。

【0085】

人間が対応する触行動をしてくれた場合には、オペレータはステップS43で“YES”と判断する。そして、続くステップS47で、「くすぐりたい」行動を実行し、つまり、「くすぐりたい」と発話する。これに対する人間の触覚インタラクションがクラス12であり、そのセンサ時系列データがクラス12に対応付けて記憶される。

【0086】

続いて、ステップS49で、「ありがとうね」行動を実行し、つまり、「ありがとうね」と発話する。これに対する触覚インタラクションで検出されたセンサ時系列データがクラス13として記憶される。

【0087】

ステップS51では、「だっこしてね」行動を実行し、つまり、「だっこしてね」と発話するとともに、両腕を開いた状態で前に出す。これに対しては、典型的には人間がロボット10を両腕の中に抱くような触行動が期待できる。この触覚インタラクションがクラス14であり、そのセンサ時系列データがクラス14に対応付けて記憶される。

【0088】

そして、ステップS53で「ばいばい」行動を実行し、つまり、腕を振りながら「ばいばい」と発話する。これに対する触覚インタラクションのセンサ時系列データがクラス15として記憶される。ステップS53を終了すると、このシナリオに基づく一連のコミュニケーションが終了する。

【0089】

10

20

30

40

50

このように、触覚インタラクションのシナリオには、ロボット10の働き掛けに対して人間が触行動を返してくれることが期待できるものと、必ずしも触行動が期待できないものが含まれているが、いずれの触覚インタラクションにおいても触覚センサ76で検出されるセンサ時系列データが各クラス番号に対応付けて記憶される。また、このような予め決めておいたシナリオに基づいて一連のコミュニケーションを実行する場合には、センサ時系列データに自動的にクラス番号を関連付けてデータベースに記憶することが可能であり、オペレータが触覚インタラクションのクラス番号を入力しなくてよい。

【0090】

図5のシナリオを用いて実際に発明者等が行った実験と、その実験で構築された触覚インタラクションデータベースに本手法を適用した結果について説明する。この実験においては、ロボット10の正面を0度として、右斜め45度、正面0度、左斜め45度の3方向にロボットから約2m離れた位置を触覚インタラクションシナリオのスタート位置とした。被験者はそれぞれ1回ずつ各スタート位置から始まるロボット10との触覚インタラクションを実施し、一人の計3回を10分間の休憩を挟んで行った。実験の1回あたりの実施時間は約5分である。被験者は大学生の男女48人を対象に行い、各被験者には基本的にはロボット10と自由に遊んでもらうように指示したあと、実験条件として、(1)ロボット10の全身は自由に触ってもよいこと、(2)ロボット10の言っている事をよく聞いて遊んでもらうこと、(3)実験が始まったらスタート位置よりロボット10に近づき、触れて、呼びかけること、の3点を説明した。ロボット10や構築システムの故障などデータベースが構築できなかった場合を除き、シナリオに沿って制御されたロボット10と人間との触覚インタラクションデータベースを、延べ約120ケースについて構築した。

【0091】

図6には、上述の図5のシナリオに基づく15クラスの触覚インタラクションの認識率が示され、図7にはそれらの誤認識率が示される。図6および図7ともに、横軸に各クラス1~15が対応する。また、図6および図7ともに、識別関数を構成する正規直交ベクトルの数を決める閾値 C_1 と、正規直交ベクトルの成分のうち0とする成分数を決定する閾値 C_2 とを組み合わせた6つの条件での結果が示されている。識別器の性能評価は、認識率および誤認識率ともに1点除外法による交差検証により行った。なお、忠実度(数5)は、認識率が下がりすぎず誤認識率が低くなるように実験的に0.95を採用した。

【0092】

今回構成した識別器は、性能評価の結果を示す図6および図7より、人間からの触行動が期待できる触覚インタラクションにおいては高い識別率を示している。つまり、本手法は触覚インタラクションの識別に有効な手法であると言える。

【0093】

$C_1 = 1.00$ の条件では、ケース数に相当する基底ベクトルから構成される約120次元の全特徴空間を用いた識別器となる。一方、 $C_1 = 0.15$ の条件では、各クラスの基底ベクトル数は3~7の範囲内であった。つまり、 $C_1 = 0.15$ の条件では、3~7次元の特徴空間の部分空間を用いた識別器となる。したがって、図6および図7から分かるように、基底ベクトルの数が少ない条件($C_1 = 0.15$)の方が識別器の性能が良くなっている。これにより、大きな特異値に対応する基底ベクトルが張る部分空間に各インタラクションの特徴が現れていることが予想できる。

【0094】

実際、最も大きな特異値に対応する正規直交ベクトル u_{i_1} より作成した、図8に示す体性感覚マップにその特徴が現れている。図8(A)は、クラス8の「よしよししてほしいな」の場合の最大特異値に対応する $u_{(8)_1}$ から作成された体性感覚マップを示し、図8(B)は、クラス11の「こちょこちょしてほしいな」の場合の最大特異値に対応する $u_{(11)_1}$ から作成された体性感覚マップを示す。

【0095】

この体性感覚マップは、識別器の出力に有用な触覚センサエレメントを決定するために

10

20

30

40

50

特徴空間の部分空間を取り出し、その空間を構成する基底ベクトルを用いて作成されたマップであり、つまり、次の数 1 0 から作成される。

【 0 0 9 6 】

【 数 1 0 】

$$d_{ij}(\mathbf{u}_{ij}) = -\log(|\mathbf{u}_{ij}|) \quad (0 \leq d_{ij} \leq \infty)$$

【 0 0 9 7 】

なお、これは、センサ間の相互相関関係を 2 次元平面に可視化するマップ作成手法を用いている。このマップ作成手法では、相互相関に注目してセンサ間の非類似度を定義し、相関が強いセンサが近くに配置されるようにしたマップが作成される。具体的には、相互相関マトリクスの各相関係数 R_{ij} から非類似度 d_{ij} への変換を次の数 1 1 のように定義する。

【 0 0 9 8 】

【 数 1 1 】

$$d_{ij}(R_{ij}) = -\log(|R_{ij}|) \quad (0 \leq d_{ij} \leq \infty)$$

【 0 0 9 9 】

自分自身のセンサとの相関係数は 1 であるので、 $d_{ii} = 0$ となる。この定義した量を距離と読み替えると、相関係数の絶対値が大きいセンサの組の非類似度が小さく、つまり、相関係数の絶対値が大きいセンサの組の距離が近くなるような定義になっている。

【 0 1 0 0 】

図 8 (A) の体性感覚マップでは、頭の触覚センサエレメントが他から分離している。図 8 (B) の体性感覚マップでは、胴体前面の触覚センサエレメント、胴体側面 (左または右) の触覚センサエレメント、および胴体上面の触覚センサエレメントが、他から分離してクラスタを形成していることが分かる。このマップ上でクラスタを形成するセンサ間の距離が近いことは、識別関数 $DF^*_i(x)$ の出力に影響する触覚センサエレメントの組み合わせであることを意味する。これが触覚センサエレメントが自己組織化した結果となる。

【 0 1 0 1 】

図 6 および図 7 における $C_2 = 0$ の 2 条件 ($C_2 = 1$, $C_2 = 2$) には、次元削減された基底ベクトルが張る特徴空間で構成された識別器の性能が示してある。 $C_2 = 1$ の条件では、未知ベクトル x の成分のうち 15% ~ 20% のみから識別関数の出力が得られる。それにも関わらず、識別器の性能はほとんど変化していない。このことから、今回定義した特徴空間上にかなり偏ってデータが分布していることが予想され、部分空間法を適用することの妥当性を考察することができる。 $C_2 = 2$ の条件では、 x の成分のうち 4% ~ 6% のみから識別関数の出力が得られ、ここではかなり識別器の性能は低下している。しかし、ごく限られた特徴空間のみを用いているにも関わらず、クラス 8 の「よしよししてほしいな」やクラス 11 の「こちょこちょしてほしいな」のクラスの認識率は依然高い値を示している。したがって、これらクラスの特徴ベクトルは特徴空間の中での局所性が高く、他のクラスに比べて特徴的な触覚インタラクションであるといえる。

【 0 1 0 2 】

この実施例では、ロボット 10 の CPU 60 が触覚インタラクションデータベース 78 のデータから上述のような触覚インタラクションの識別器を作成し、触覚センサ 76 の各ノード 80 に転送する。したがって、各ノード 80 では、識別に有用なセンサエレメントが分かるので、この有用なセンサエレメントの組み合わせで分散処理を行うことが可能になる。

【 0 1 0 3 】

図 9 および図 10 には、分散処理のための各種テーブルを作成する処理の動作の一例が

10

20

30

40

50

示される。この実施例では、触覚センサ76（センサネットワーク）のホストコンピュータないしホストCPUであるCPU60によって、この分散処理テーブル作成処理が実行される。

【0104】

なお、分散処理テーブルの作成は、ロボット10と通信可能な外部のコンピュータ、たとえば上述の触覚インタラクショndataベース78の構築実験を行うシステムにおける外部コンピュータ等によって実行し、作成したテーブルをロボット10に送信するようにしてもよい。

【0105】

作成されるテーブルは、識別関数テーブルDF、近似識別関数テーブルDF*、転送経路テーブルTD、および転送量テーブルTR等を含む。

10

【0106】

識別関数テーブルDFは、近似識別関数テーブルDF*を作成するために作成される。識別関数は、N個の触覚センサエレメントのうち2つのセンサ(i, j) (i, j = 1, 2, ..., N)の時系列データの組み合わせから計算される特徴量（相互相関係数）を入力とする識別器であり、上述の数4のように表される。ここで作成される識別関数テーブルDFは、数4における正規直交ベクトル u_{ij} に相当する。

【0107】

近似識別関数は、閾値 C_2 より小さい基底の成分を0とすることによって近似された識別器であり、上述の数8のように表される。ここで作成される近似識別関数テーブルDF*は、数8におけるベクトル u^*_{ij} に相当する。

20

【0108】

転送経路テーブルTDは、各触覚センサエレメント58のセンサ時系列データをどの経路で通信し、どのノード80にセンサ時系列データを集めて、特徴量を計算するかを決定するためのテーブルである。センサの組(i, j)に対応する各要素には、(i, j)の2つのセンサ時系列データを、或る1つのノード80に収集するためのデータ通信経路が記録される。

【0109】

転送量テーブルTRは、各センサ時系列データのノード間での転送量を決定するテーブルである。センサの組(i, j)に対応する各要素には、転送経路テーブルTDの各要素に対応した転送量が記録される。

30

【0110】

また、転送量が許容範囲内であるかどうかを確認するために、転送負荷テーブルTRSが作成される。ノードの組(n, m)に対応する各要素は、転送経路テーブルTDおよび転送量テーブルTRに基づいて計算され、各ノード(n, m)間での総通信量を表す。送信と受信が別であるとすると、たとえばノード(A, B)間において、AからBへの経路の総通信量はTRS(A, B)で、BからAへの経路の総通信量はTRS(B, A)で表される。

【0111】

分散処理テーブル作成処理を開始すると、まず、ステップS101で、触覚インタラクショndataから部分空間法によってクラスごとに識別器を作成する。ここでは、上述の数3に示した特異値分解の結果として得られる正規直交ベクトル u_1, u_2, \dots, u_r をクラスiごとに算出する。

40

【0112】

次に、ステップS103で、パラメータ C_1 によって識別器を簡単化し、クラスごとの識別関数テーブルDFを作成する。パラメータ C_1 は、累積寄与率に関する閾値であって、識別関数を構成する正規直交ベクトルの数 d_i を決める。これによって、クラスiごとに、正規直交ベクトル u_{ij} が特異値の大きいものから順に d_1 から d_i まで採用される。したがって、上述の数4における u_{ij} が得られ、この u_{ij} によってクラスごとの識別関数テーブルDFを作成する。

50

【 0 1 1 3 】

なお、パラメータ C_1 には、所定値が初期値として与えられる。作成した識別器の性能評価によって適切な認識率・誤認識率が得られるように、パラメータ C_1 の値は、たとえば一定値ずつ加減すること等によって適宜変更される。

【 0 1 1 4 】

さらに、ステップ S 1 0 5 で、パラメータ C_2 によってテーブル D F を単純化し、クラスごとの近似識別関数テーブル D F * を作成する。パラメータ C_2 は、正規直交ベクトルの成分のうち 0 とする成分数を決定する閾値である。したがって、クラス i ごとに、上述の数 8 における $u^*_{i j}$ を算出し、この $u^*_{i j}$ によってクラスごとの近似識別関数テーブル D F * を作成する。

10

【 0 1 1 5 】

なお、パラメータ C_2 には、所定値が初期値として与えられる。パラメータ C_1 の場合と同様に、作成した識別器の性能評価によって適切な認識率・誤認識率が得られるように、パラメータ C_2 の値は、たとえば一定値ずつ加減すること等によって適宜変更される。

【 0 1 1 6 】

このクラス別の近似識別関数テーブル D F * を用いて、計測されたセンサ時系列データに基づいて、数 8 の識別関数出力 $D F^*_{i j}(x)$ を計算することが可能になり、したがって、触覚インタラクションのクラスを識別することが可能になる。

【 0 1 1 7 】

続いて、ステップ S 1 0 7 で、認識対象のクラスセットごとに転送経路テーブル T D および転送量テーブル T R を作成するために、各クラスの近似識別関数テーブル D F * を包括するテーブルを作成する。

20

【 0 1 1 8 】

ここで、認識対象のクラスセットは、認識対象とする複数のクラスの組み合わせである。つまり、この実施例では、ロボット 1 0 が人間とコミュニケーションしているときに、触覚インタラクションデータベース 7 8 に登録された全クラスを認識の対象とはせず、限定された数のクラスを認識の対象とするようにしている。人間とロボット 1 0 のコミュニケーションが成立する場合には、状況に応じたインタラクションが発生するものと期待できるからである。たとえば、ロボット 1 0 が「握手してね」行動を行っているときには、ロボット 1 0 の手 3 8 や腕 2 8 および 3 0 を触るような触覚インタラクションは起こり得ると予期されるが、「よしよししてほしいな」や「ちょちょしてほしいな」等に対応する触覚インタラクションは、通常は起こらないものと予期される。したがって、ロボット 1 0 が認識対象とすべき触覚インタラクションのクラスを、状況に応じて限定することができる。そこで、この実施例では、ロボット 1 0 の実行しているコミュニケーション行動もしくは働き掛けのような種々の状況ごとにクラスセットを予め決めておいて、これら複数のクラスセットをそれぞれの状況に対応付けて予め記憶しておく。そして、触覚センサ 7 6 の各ノード 8 0 では、状況に対応するクラスセットに規定された複数のクラスを識別の対象として分散処理を行うようにする。

30

【 0 1 1 9 】

なお、他の実施例では、1つの触覚インタラクションのクラスのみを識別対象としてもよく、その場合、当該クラスの近似識別関数テーブル D F * に基づいて、当該クラスの転送経路テーブル T D および転送量テーブル T R が作成される。

40

【 0 1 2 0 】

また、各ノード 8 0 において、上述のような識別関数に基づく処理を行うためには、入力ベクトル x の特徴量算出のために、ノード 8 0 間で必要なセンサ時系列データを通信し、或る1つのノード 8 0 に収集する必要がある。クラスごとに有用なセンサの組み合わせは異なり、クラスごとの近似識別関数テーブル D F * を用いてクラスごとの算出が行われるので、必要なセンサ時系列データのための通信経路は本来クラスごとに異なるものである。しかし、この実施例では、クラスセットに含まれる複数のクラスが認識対象であるので、複数のクラスのそれぞれの近似識別関数に基づく処理を行うために必要なすべてのセ

50

ンサ時系列データを通信しなければならない。

【 0 1 2 1 】

そこで、この実施例では、このステップ S 1 0 7 で、認識対象クラスセットごとに転送経路テーブル T D および転送量テーブル T R を作成するために、当該クラスセットに含まれる各クラスの近似識別関数テーブル D F * を包括するテーブル、つまり、クラスセットの複数のクラスで必要なセンサ時系列データ通信のすべてを網羅するテーブルを作成する。

【 0 1 2 2 】

たとえば、クラスセットの複数のクラスのいずれかの近似識別関数テーブル D F * において、要素（センサ組み合わせ）の値に 0 以外が記録されていれば、当該要素の値にたとえば 1 を設定することによって、包括するテーブルを作成するようにしてよい。または、各クラスのテーブル D F * における各要素のうち絶対値が最大であるものを当該要素の値として採用することによって、包括するテーブルを作成してよいし、あるいは、各要素の値の平均値を当該要素の値に設定することによって作成してもよい。

10

【 0 1 2 3 】

続いて、ステップ S 1 0 9 で、クラスセットに対応する転送経路テーブル T D を生成する。同一ノードに所属するセンサ同士には、通信が不要であるから、このステップ S 1 0 9 では、当該センサ同士の各要素には、たとえば当該所属ノードから所属ノードへの経路を示すデータを記憶しておく。

【 0 1 2 4 】

なお、ロボット 1 0 のメモリ 6 4 には、各ノード 8 0 の識別情報に対応付けた各ノード 8 0 に所属する触覚センサエレメント 5 8 の識別情報を示すデータ、各ノード 8 0 の接続構造（隣接するノード 8 0 の識別情報など）を示すデータなどが記憶されている。

20

【 0 1 2 5 】

続くステップ S 1 1 1 からステップ S 1 1 7 の処理で、当該転送経路テーブル T D において、異ノードに所属するセンサの組み合わせの各要素のための経路を選択して記憶する。

【 0 1 2 6 】

具体的には、ステップ S 1 1 1 では、当該クラスセットの各クラスの D F * を包括するテーブルにおいて、転送のホップ数が最も少ない要素のうち絶対値が最大の要素を選択する。なお、各ノード間のホップ数は、ノード 8 0 の接続構造を示すデータから把握される。

30

【 0 1 2 7 】

次に、ステップ S 1 1 3 で、当該要素のセンサの所属ノード間について、最短経路でノード間の通信量が最も少ない経路を選択し、当該経路を示すデータを、転送経路テーブル T D の要素に追加（記録）する。

【 0 1 2 8 】

続くステップ S 1 1 5 で、追加したセンサ時系列データ通信を利用できる転送経路テーブル T D の要素にも、当該選択した経路を示すデータを追加する。つまり、ステップ S 1 1 3 で追加した経路で通信されたセンサ時系列データを利用できる要素がある場合には、当該要素にも同じ経路を書込んでおく。

40

【 0 1 2 9 】

そして、ステップ S 1 1 7 で、すべての要素の経路が決まったか否かを判断する。ステップ S 1 1 7 で“ Y E S ”と判断されるまで、ステップ S 1 1 1 - S 1 1 5 の処理を繰り返して、当該クラスセットに対応する転送経路テーブル T D のすべての要素についてホップ数分の経路を決定し、この転送経路テーブル T D を完成させる。

【 0 1 3 0 】

ステップ S 1 1 7 で“ Y E S ”の場合には、図 1 0 のステップ S 1 1 9 で、当該クラスセットの転送経路テーブル T D に基づいて、転送量テーブル T R を作成する。具体的には、転送量テーブル T R の各要素に、転送経路テーブル T D における各要素の経路に対応し

50

た転送量が記録される。

【0131】

続くステップS121で、当該クラスセットの転送経路テーブルTDおよび転送量テーブルTRに基づいて、転送負荷テーブルTRSを計算する。具体的には、全ノード数をMとし、2つのノードの組み合わせを (n, m) ($n, m = 1, \dots, M$)で表すと、ノード (n, m) 間における、ノードnからノードmへの経路の総通信量と、ノードmからノードnへの経路の総通信量が計算される。

【0132】

そして、ステップS123で、ネットワーク帯域に余裕があるか否かを転送負荷テーブルTRSに基づいて判断する。具体的には、各ノード間の通信量が所定の最大値以内におさまっているかどうかを判断する。

10

【0133】

ステップS123で“NO”の場合、ステップS125で、TRSの通信量が許容範囲内におさまるように調整した転送量テーブルTR*を作成する。具体的には、転送負荷テーブルTRSにおける最大値を超えたノード間の総通信量が最大値以内におさまるように、転送量テーブルTRにおいて対応する経路の転送量を低減させる。ホップ数の大きい経路ほど、転送量をより減少させるようにしてよく、一例として、新たな転送量は、元の転送量をホップ数の関数で割ることによって算出されてよい。続くステップS127で、調整した転送量テーブルTR*と転送経路テーブルTDに基づいて、調整後の転送負荷テーブルTRS*を計算して、各ノード間の通信量が許容範囲内であることを確認する。

20

【0134】

一方、ステップS123で“YES”の場合、つまり、通信負荷がネットワーク帯域の許容範囲内におさまっている場合には、ステップS129で、全クラスセットの計算が終わったか否かを判断する。ステップS129で“NO”の場合、図9のステップS109に戻り、残りのクラスセットのためのテーブル作成を行う。

【0135】

ステップS129で“YES”の場合、作成した分散処理テーブル、すなわち、クラス別の近似識別関数テーブルDF*、クラスセット別の転送経路テーブルTDおよび転送量テーブルTRをネットワークノード80へ転送する。なお、調整した転送量テーブルTR*を作成した場合には、テーブルTRではなく、当該テーブルTR*を送信する。

30

【0136】

なお、この実施例では、転送量テーブルTR(またはTR*)を作成するようにしているが、すべての転送量を予め一定値(転送負荷が許容範囲内に十分におさまるような値)に決めておく場合には、TRの作成は必要ない。

【0137】

以上のような分散処理テーブルの具体的な作成例を、簡略化したセンサネットワークを対象にして説明する。図11に、この説明のためのモデルとしての触覚センサ76を示す。9枚の触覚センサエレメント58と3つのノード80が設けられている。各ノード80には3枚ずつ触覚センサエレメント58が所属している。具体的には、ノードAにはセンサ番号1-3の触覚センサエレメントが所属し、ノードBにはセンサ番号4-6が所属し、ノードCにはセンサ番号7-9が所属している。また、ノード同士は相互にA-B間と、B-C間とで接続されている。

40

【0138】

図12(A)は、識別関数テーブルDFの一例を示す。なお、この作成例では、簡単のため、特徴空間を構成する基底ベクトルのうち、寄与率の最も高い1つの基底ベクトルのみを採用した場合を示している。図12(B)は、簡単化した(近似)識別関数テーブルDF*の一例を示す。ここで採用されている閾値は、一例として0.27であり、これは、成分の標準偏差0.27とパラメータ $C_2 = 1$ との積により得られる。近似識別関数テーブルDF*は、識別関数テーブルDFにおいて0.27より小さい絶対値の成分を0とすることによって作成されている。

50

【 0 1 3 9 】

続いて、認識対象のクラスセットの各クラスの近似識別関数テーブル DF^* を包括するテーブルを作成し、当該クラスセットに対応する転送経路テーブル TD を作成する。図 13 は、近似識別関数テーブル DF^* から作成された転送経路テーブル TD の一例を示す。なお、この作成例では、便宜上、図 12 (B) に示すテーブルが認識対象のクラスセットの各クラスを包括するテーブルであるものとして、図 13 の転送経路テーブル TD を作成している。

【 0 1 4 0 】

まず、同一ノード 80 に所属する触覚センサエレメント 58 同士の計算には他のノードとの通信が不要である。したがって、転送経路としては、 AA 、 BB 、 CC のように当該ノード同士を結ぶ経路が記録される。たとえば、ノード A に所属するセンサ番号 1 とセンサ番号 3 の計算は、ノード A 内の処理のみで完了するので、センサ番号 1 の行とセンサ番号 3 の列をと結ぶ欄には、 AA が記載されている。

10

【 0 1 4 1 】

そして、図 9 のステップ $S111$ の処理によって、転送ホップ数が最小であり、かつ、絶対値が最大の要素を選択し、この選択した要素から順に転送経路を決めていく。ホップ数が 1 である組み合わせは、隣のノード 80 に相手の触覚センサエレメント 58 が存在する組み合わせであり、この作成例では、ノード AB 間の組み合わせとノード BC 間の組み合わせである。それらのうち絶対値が最大の要素は、絶対値 0.9 の要素であり、つまり、センサ番号の組が $(3, 4)$ 、 $(6, 7)$ である。このうち、まず、たとえばセンサ番号の小さい方の $(3, 4)$ を選択する。

20

【 0 1 4 2 】

続いて、図 9 のステップ $S113$ の処理によって、選択した要素のために、最短経路で、ノード間の通信量が最も少ない経路を選択する。今回の $(3, 4)$ にはノード AB 間の通信が必要であるから、ノード A からノード B への通信を選択し、テーブルの $(3, 4)$ の要素に「 $AB1$ 」を追加（記憶）する。この選択は、 A から B への通信の最初の選択であるから、「 AB 」に「1」が付与されている。つまり、「 $AB1$ 」は、 A から B への通信であり、かつ、その 1 回目であることを意味する。

【 0 1 4 3 】

さらに、図 9 のステップ $S115$ の処理によって、この追加したデータ通信を利用できる要素に、当該経路を追加する。今回のセンサ番号 3 の時系列データの A から B への通信により、ノード B においてセンサ番号 3 のデータを、 $(3, 5)$ および $(3, 6)$ の組の計算でも使用できるので、テーブルの $(3, 5)$ および $(3, 6)$ の要素にも、「 $AB1$ 」を追加する。

30

【 0 1 4 4 】

このように、 $(3, 4)$ の選択から始まった処理によって、 $(3, 4)$ 、 $(3, 5)$ および $(3, 6)$ の経路が決められる。絶対値が 0.9 である $(6, 7)$ についても、同様にして、経路が決められ、 $(6, 7)$ 、 $(6, 8)$ および $(6, 9)$ に「 $BC1$ 」が追加される。

他の組についても、同様な処理を繰返して経路を決めていく。

40

【 0 1 4 5 】

たとえば、絶対値が 0.7 である $(2, 4)$ の組については、ノード AB 間の通信として既にノード A からノード B への「 $AB1$ 」が選択されているので、同方向の通信を増やすのではなく、逆方向のノード B からノード A への通信を選択し、テーブルの $(2, 4)$ の要素に「 $BA1$ 」を追加する。このセンサ番号 4 の時系列データの B から A の通信によって、ノード A においてセンサ番号 4 のデータを $(1, 4)$ の組でも利用できるので、テーブルの $(1, 4)$ にも、「 $BA1$ 」を追加する。

【 0 1 4 6 】

また、ホップ数が 2 の要素については、まず、絶対値が 0.5 である $(3, 7)$ の組を選択する。センサ番号 3 の時系列データは、 $AB1$ によってノード B にあるので、センサ

50

番号7の時系列データをノードBに送ればよい。したがって、「CB3」を選択する。なお、この(3,7)の計算には、「AB1」も必要であるから、テーブルの(3,7)には「CB3/AB1」と記憶する。

【0147】

さらに、センサ番号7の時系列データのCからBへの通信「CB3」を、(1,7)の組で利用できる。センサ番号1の時系列データは、ノードBにはない。また、AB間の通信は、AB1、BA1およびAB2まで選択されている。したがって、センサ番号7の時系列データをBからAへ送信する「BA2」を選択する。テーブルの(1,7)には「CB3/BA2」を追加する。

【0148】

このようにして、転送経路テーブルTDを作成でき、このテーブルTDによって、各センサの時系列データの転送経路、ノード間の通信回数、センサ間の特徴量を計算するノード等を把握することができる。

【0149】

続いて、転送量テーブルTRが作成される。転送量テーブルTRおよび転送負荷テーブルTRSの一例が図14に示される。この例では、1ホップの通信量を「100」とする。したがって、図14(A)の転送量テーブルTRの各経路には「100」が記載される。また、同一ノード間の組には通信が不要であるから「0」が記憶される。

【0150】

転送経路テーブルTDと転送量テーブルTRに基づいて図14(B)の転送負荷テーブルTRSが作成される。転送負荷テーブルTRSは、ノード間の通信量を示している。ノードAB、BA、BC間には、それぞれ転送量100の2回の通信が必要であるから、テーブルTRSの(A,B)、(B,A)および(B,C)には、「2」が記載される。ノードCB間には3回の通信が必要であるからテーブルTRSの(C,B)には「3」が記載される。

【0151】

この転送負荷テーブルTRSに基づいて帯域に余裕があるかどうか判断される。ここで、たとえば転送負荷量が最大値3よりも小さいことが必要とされる場合には、通信CBが許容範囲を超えるので、転送量の調整を行う。調整した転送量テーブルTR*および調整後の転送負荷テーブルTRS*の一例が図15に示される。ここでは、ホップ数の大きい要素の通信量を減らす。つまり、(1,7)および(3,7)の「CB3」の通信量を50に減らす。たとえば元の転送量をホップ数で割ることによって調整後の転送量を算出する。この通信を利用する(1,7)の「BA2」も50になる。なお、(3,7)の「AB1」は、(3,4)の通信の利用であるから、通信量は100のままである。この図15(A)のテーブルTR*と図13のテーブルTDに基づいて、図15(B)のテーブルTRS*を作成し、転送負荷が許容範囲内におさまったことを確認することができる。「CB3」と「AB2」の通信量がそれぞれ半減されたので、(C,B)の転送負荷が2.5になり、(B,A)の転送負荷が1.5になり、最大値3よりも小さい値に抑えられている。

【0152】

このようにして作成された分散処理テーブルは、上述のように図10のステップS131でCPU60から各ノード80に送信されて、各ノード80で保持される。図16に各ノード80のテーブル更新処理の動作が示される。各ノード80のプロセッサユニット86は、一定時間ごとにこのテーブル更新処理を実行する。

【0153】

具体的には、ステップS201では、ホストCPU60からバス82を介してテーブルを受信した否かを判断する。ステップS201で“NO”の場合には、そのままこの更新処理を終了する。一方、ステップS201で“YES”の場合には、ステップS203で、受信した分散処理テーブルを、プロセッサユニット86に内蔵されるメモリに保存(記憶)する。分散処理テーブルは、上述のように、クラスごとの近似識別関数テーブルDF

10

20

30

40

50

、クラスセットごとの転送経路テーブルTDおよび転送量テーブルTR（またはTR）を含む。なお、この分散処理テーブルの保存メモリとしてフラッシュメモリのような不揮発性メモリを適用した場合には、ロボット10の電源を切っても各ノード80が分散処理テーブルを保持できるので、ロボット10の電源をオンするたびにCPU60からの分散処理テーブルの送信処理を行わなくてもよく、当該分散処理テーブルの送信処理は、分散処理テーブルが再構成されて更新されたときにだけ行うようにすればよい。

【0154】

なお、上述の正規直交ベクトル U_{ij} の成分を0にするための閾値 C_2 を考慮しない場合、つまり、閾値 C_2 が0の場合、近似識別関数テーブルDF*は、識別関数テーブルDFであり、これが分散処理テーブルとして送信されて、各ノード80のプロセッサユニット86に記憶される。

10

【0155】

続いて、ロボット10が人間とコミュニケーションをしている場合に実行される触覚インタラクションの識別段階の処理について説明する。ロボット10では、人間に提示しようとしている行動（身振りおよび/または発話）に対して、人間が行うであろうと予期できる複数の触行動（触覚インタラクション）が認識対象クラスセットとして予め記憶されている。各行動を提示するための処理とともに、対応するクラスセットを認識対象として識別処理を実行することによって、予期できる複数の触覚インタラクションのクラスのうち、どのクラスが実行されたのか、または、認識対象のクラスセットのクラス以外の予期しない触覚インタラクションが実行されたのかを識別することができる。

20

【0156】

図17および図18にCPU60（触覚センサ76のホスト）によって実行される識別処理の動作の一例が示される。識別処理を開始すると、ステップS301で、認識対象のクラスセットをネットワークノード80にブロードキャストする。送信されるクラスセットのデータは、各クラスの識別番号を含んでおり、これによって、触覚センサ76の各ノード80に認識対象の複数のクラスを知らせて、使用する分散処理テーブルを知らせることができる。

【0157】

続いて、ステップS303で、センサ時系列データのIn点をネットワークノード80にブロードキャストする。時系列データのIn点は、各触覚センサエレメント58により検出された時系列データの記録の開始点を指示するためのデータであり、たとえば開始時刻が指定されてよいし、または開始命令であってよい。

30

【0158】

これによって、各ノード80では、サンプリングされたセンサ時系列データの記録（蓄積）が開始される。また、各ノード80では、転送経路テーブルTDと転送量テーブルTRに基づくデータ交換が開始される。さらに、この実施例のように、識別器のメンテナンスのためのデータ収集として、各ノード80はセンサ時系列データをホストCPU60に送信してもよい。

【0159】

そして、ステップS305で、センサ時系列データを受信したかどうかを判断し、“YES”の場合、ステップS307で、センサ時系列データをメモリ64に記憶する。なお、センサ時系列データは、一定時間分の検出データのほかに、当該ノード80の識別情報、当該触覚センサエレメント58の識別情報およびタイムスタンプ（検出時刻情報）を含んでいる。ステップS307を終了すると処理はステップS305へ戻る。

40

【0160】

一方、ステップS305で“NO”の場合、ステップS309で現在の時刻がOut点になったか否かを判断する。Out点は、認識対象の複数のクラスの識別に必要な時間分のセンサ時系列データの計測が行えるように決められる。たとえば、クラスセットごとにIn点からの必要な時間が予め記憶される。つまり、このステップS309では、In点の送信から所定時間が経過したかが判断される。

50

【 0 1 6 1 】

ステップ S 3 0 9 で “ N O ” の場合、つまり、計測がまだ必要である場合には、処理はステップ S 3 0 5 に戻る。したがって、受信待機、および受信データの記録が繰返されて、 I n 点から O u t 点までのセンサ時系列データが取得される。

【 0 1 6 2 】

なお、識別器のメンテナンス、つまり、学習による識別器の再構成を行わない場合には、センサ時系列データのノード 8 0 からの収集は行わなくてよい。各ノード 8 0 での分散処理によって、触覚インタラクションのクラスの識別ための処理（類似度の算出）が行われており、ホストである C P U 6 0 がセンサ時系列データを受信しなくてもクラス識別を行うことができるからである。

10

【 0 1 6 3 】

一方、ステップ S 3 0 9 で “ Y E S ” の場合、ステップ S 3 1 1 で、センサ時系列データの O u t 点をネットワークノード 8 0 にブロードキャストする。この O u t 点は、センサ時系列データの記録の終了点を指示するデータであり、たとえば終了時刻が指定されてよいし、または終了命令であってよい。これによって、各ノード 8 0 では、センサ時系列データの記録が終了される。そして、記録したセンサ時系列データと識別関数テーブルに基づいて、クラス識別のための類似度算出処理が開始されることとなる。

【 0 1 6 4 】

なお、この実施例では、 C P U 6 0 で O u t 点になったと判断されるときに O u t 点を各ノード 8 0 に送信するようにしているが、他の実施例では、 I n 点と同時に、または I n 点送信のすぐ後に、 O u t 点を予め送信するようにしてもよく、その場合、 O u t 点は、たとえば記録終了の予定時刻または記録の継続時間であってよい。

20

【 0 1 6 5 】

続くステップ S 3 1 3 では、識別対象クラスの類似度を受信したかどうかを判断する。 O u t 点の送信後、各ノード 8 0 からは、当該ノード 8 0 において算出可能な部分特徴空間の各クラスの類似度が送信されてくるので、その受信を行う。ステップ S 3 1 3 で “ N O ” の場合、一定時間受信を待機して、再びステップ S 3 1 3 の処理を行う。一方、ステップ S 3 1 3 で “ Y E S ” の場合、ステップ S 3 1 5 で、受信した識別対象クラスの類似度をメモリ 6 4 に記憶する。そして、ステップ S 3 1 7 で、全ノード 8 0 から類似度を受信したか否かを判断する。ステップ S 3 1 7 で “ N O ” の場合、つまり、受信すべき類似度が残っている場合には、処理はステップ S 3 1 3 に戻る。一方、ステップ S 3 1 7 で “ Y E S ” の場合には、処理は図 1 8 のステップ S 3 1 9 へ進む。

30

【 0 1 6 6 】

図 1 8 のステップ S 3 1 9 では、各ノード 8 0 が持つ部分特徴空間での類似度を識別対象クラスごとに合計する。具体的には、上述の数 8 の右辺における合計が行われる。したがって、クラスごとの識別関数出力を算出することができる。続くステップ S 3 2 1 で、クラスごとの合計値を比較して最大のクラスを検出する。認識対象のクラスセットのうち、この最大値を示したクラスの触覚インタラクションが行われたことが推定されるが、この段階では、未だ仮の推定であり、次のステップ S 3 2 3 でリジェクト判定を行う。つまり、上述の数 5 の判定を行う。最大値を示すクラス 1 の識別関数出力と、それ以外のクラスの識別関数出力のうちの最大値とが、数 5 の関係式を満たさない場合には、リジェクトである、つまり、認識対象のクラスセットのクラス以外の触覚インタラクションが行われたことが判定される。

40

【 0 1 6 7 】

そして、ステップ S 3 2 5 で識別結果の出力を行う。つまり、ステップ S 3 2 3 のリジェクト判定で数 5 の関係式が成立した場合には、最大値を示したクラスの触覚インタラクションが行われことが識別されたので、当該クラスを示すデータを結果として出力する。一方、リジェクトの場合は、予期しない触覚インタラクションが行われたことが識別されたので、当該リジェクトを示すデータを結果として出力する。

【 0 1 6 8 】

50

したがって、ロボット10の制御コンピュータとしてのCPU60は、センサ時系列データを自分で処理しなくても、複数のノード80において分散処理した結果を用いて触覚インタラクションを識別することができる。なお、ロボット10は、この識別結果と実行した行動に応じて、人間とのコミュニケーションの状況を把握することができ、したがって、当該状況に応じた、次に実行すべき行動を適切に選択することができる。

【0169】

続くステップS327からステップS335の処理は、識別器のメンテナンス用の処理であり、識別器の検証、学習、再構成などのメンテナンスを行う場合に実行すればよい。具体的には、ステップS327で、部分特徴空間の成分を受信したか否かを判断する。各ノード80からは、類似度の送信後、この成分が送られてくる。このステップS327で
10 “NO”の場合、一定時間受信を待機する。一方、ステップS327で“YES”の場合には、ステップS329で、受信した部分特徴空間の各成分をメモリ64に記憶する。この部分特徴空間の各成分は、数9の特徴ベクトルのうち、各ノード80が計算可能な成分である。そして、ステップS331で全ノード80から部分特徴空間の成分を受信したか否かを判断する。ステップS331で“NO”の場合には、処理はステップS327に戻り、残りのノード80からの受信処理を繰返す。

【0170】

一方、ステップS331で“YES”の場合には、ステップS333で、メモリ64に記憶したセンサ時系列データおよび特徴空間を触覚インタラクションデータベース78に記録する。ステップS325で出力された識別結果も対応付けて記録する。
20

【0171】

そして、ステップS335で、正解の触覚インタラクションが与えられる場合に、識別器の再構成を行う。正解の触覚インタラクションが与えられるのは、たとえば上述のデータベース構築実験のように所定のシナリオに沿ったコミュニケーションを人間との間で実行している場合であり、この場合、CPU60は、シナリオの進行に応じて自動的に正解の触覚インタラクションのクラスを特定することができる。したがって、図9に示した分散処理テーブルの作成処理と同様にして、識別器を再構成し、分散処理のための各種テーブルを再作成することができる。また、正解のクラスと識別結果に基づいて認識率・誤認識率などを算出することができるので、パラメータC1およびパラメータC2も適宜な値に再設定して、識別器の再構成を行うこともできる。ステップS335を終了すると、この識別処理を終了する。
30

【0172】

図19には、ノード80のプロセッサユニット86によって実行されるノード分散処理の動作の一例が示される。この分散処理はたとえば一定時間ごとに実行される。

【0173】

なお、各ノード80のプロセッサユニット86の内蔵メモリには、自身のノード識別情報を示すデータ、所属する触覚センサエレメントの識別情報を示すデータ、隣接するノード80の識別情報を示すデータなどが記憶されている。

【0174】

まず、ステップS401で、認識対象のクラスセットをホストCPU60から受信した
40 か否かを判断する。上述のように、識別処理では認識対象のクラスセットがホスト60から送信されてくる。ステップS401で“NO”の場合、この分散処理を終了する。

【0175】

一方、ステップS401で“YES”の場合、ステップS403で、受信した認識対象のクラスセットを内蔵メモリに記憶する。認識対象のクラスセットは、識別しようとする複数のクラスを含んでいる。このクラスセットの受信によって、内蔵メモリに既に記憶されている分散処理テーブルのうち、使用するテーブルを特定することができる。具体的には、近似識別関数テーブルTD*の場合、クラスセットに含まれる各クラスに対応するテーブルが参照され、転送経路テーブルTDおよび転送量テーブルTRの場合、クラスセットに対応するテーブルがそれぞれ参照されることとなる。
50

【 0 1 7 6 】

続くステップS 4 0 5では、I n点をホスト6 0から受信したか否かを判断する。上述のように、センサ時系列データの記録の開始を指示するI n点がホスト6 0から送信されてくるので、その受信を待機する。

【 0 1 7 7 】

ステップS 4 0 5で“ Y E S ”の場合には、ステップS 4 0 7で、センサ時系列データの蓄積を開始する。この蓄積処理は図1 9の処理等と並列的に実行される。各触覚センサエレメント5 8の出力は、A / D変換器8 8によって所定周期でサンプリングされて、その出力データはプロセッサユニット8 6のバッファに記憶されている。したがって、蓄積処理では、一定時間ごとに、各触覚センサエレメント5 8のサンプリングデータをバッファから読み出して、内蔵メモリの所定領域に蓄積する。また、センサ時系列データには、サンプリングされたデータに、当該ノード8 0の識別情報、当該触覚センサエレメント5 8の識別情報、およびタイムスタンプ等の情報が付加される。

10

【 0 1 7 8 】

また、ステップS 4 0 9で、データ交換処理を開始する。このデータ交換処理は、図1 9の処理等と並列的に実行され、これによって、転送経路テーブルT Dおよび転送量テーブルT Rに基づいて、近隣のノード8 0との間でセンサ時系列データの送受信が行われる。このデータ交換処理の動作の一例が図2 0に詳細に示される。

【 0 1 7 9 】

図2 0のステップS 5 0 1では、送信タイミングになったか否かを判断する。データの送信は、たとえば一定時間ごとに実行される。ステップS 5 0 1で“ Y E S ”の場合には、ステップS 5 0 3で、クラスセットに対応する転送経路テーブルおよび転送量テーブルT Rに基づいて、他のノード8 0にセンサ時系列データを送信する。各ノード8 0は、通信経路テーブルT Dを参照して、通信経路の順に、所属する触覚センサエレメント5 8のセンサ時系列データを送信する。各触覚センサエレメント5 8のセンサ時系列データの転送量は、転送量テーブルT Rに記録された転送量に決定される。なお、センサ時系列データには、所属ノードの識別情報、触覚センサエレメントの識別情報、およびタイムスタンプ等が付加されている。

20

【 0 1 8 0 】

ステップS 5 0 3を終了し、またはステップS 5 0 1で“ N O ”の場合、ステップS 5 0 5で、センサ時系列データを他のノード8 0から受信したか否かを判断する。ステップS 5 0 5で“ Y E S ”の場合には、ステップS 5 0 7で、受信したセンサ時系列データを内蔵メモリに記憶する。なお、受信したセンサ時系列データに付加されているノードの識別情報および触覚センサエレメントの識別情報と、転送経路テーブルT Dとを参照することによって、必要とするセンサ時系列データを受信できたかどうかを判定することが可能である。

30

【 0 1 8 1 】

ステップS 5 0 7を終了し、またはステップS 5 0 5で“ N O ”の場合には、ステップS 5 0 9で、交換終了か否かを判断する。たとえば、ホスト6 0からセンサ時系列データの記録の終了を指示するO u t点を受信したかどうかを判断する。ステップS 5 0 9で“ N O ”の場合、処理はステップS 5 0 1に戻り、データ交換を続ける。一方、ステップS 5 0 9で“ Y E S ”の場合、このデータ交換処理を終了する。

40

【 0 1 8 2 】

このようなデータ交換処理が、図1 9のステップS 4 0 9で開始される。したがって、各ノード8 0には、当該ノード8 0で算出すべき特徴量のために必要な他のノード8 0の触覚センサエレメント5 8のセンサ時系列データが収集されることとなる。

【 0 1 8 3 】

続いて、ステップS 4 1 1で、蓄積された一定時間分のセンサ時系列データをホスト6 0に転送する。ここで送信するセンサ時系列データは、所属する触覚センサエレメント5 8のデータである。また、このセンサ時系列データは、識別器のメンテナンス用であり、

50

メンテナンスを行わない場合には、このホスト60への転送は行われぬ。なお、全体のノード80がホスト60へ送信できるように、転送量をステップS409のデータ交換処理における転送量よりも減少させるようにしてよい。

【0184】

そして、ステップS413で、Out点をホスト60から受信したか否かを判断する。Out点は、上述のように、センサ時系列データの記録の終了を指示するものである。ステップS413で“NO”の場合、処理はステップS411に戻る。したがって、センサ時系列データの蓄積、データ交換処理、およびホスト60への転送が続けられる。

【0185】

一方、ステップS413で“YES”の場合には、つまり、センサ時系列データの記録の終了が指示された場合には、ステップS415で、In点からOut点までの蓄積されたセンサ時系列データから特徴量を算出する。具体的には、このノード80に転送経路テーブルTDに基づいてセンサ時系列データが収集された触覚センサエレメント58の組み合わせについて、上述の数9に示したような特徴ベクトルの成分をセンサ時系列データから算出する。なお、特徴量は、最大限の高い時間分解能で算出されるのが望ましい。

【0186】

続くステップS417で、クラス別の近似識別関数テーブルDF*に基づいて、部分特徴空間での各クラスの類似度を算出する。ここでいう部分特徴空間は、このノード80で計算できる触覚センサエレメント58の組み合わせについての特徴ベクトル、つまり、ステップS415で算出された特徴ベクトルを意味する。したがって、このステップS417では、認識対象の各クラスについて、近似識別関数テーブルTD*と特徴ベクトルに基づいて、このノード80で計算できる触覚センサエレメント58の組み合わせの要素についての上述の数8の計算が行われて、このノード80の有する部分特徴空間での各クラスの類似度が算出される。このように、触覚センサ76では、分散処理テーブルに基づいて、触覚インタラクションの識別のための分散処理を各ノード80で実行することができる。

【0187】

そして、ステップS419で、算出された各クラスの類似度をホスト60に送信する。これによって、ホスト60は、上述のように、各ノード80における各クラスの類似度を取得してそれらを合計することによって、数8の識別関数出力を認識対象のクラスごとに算出することができる。

【0188】

また、ステップS421では、部分特徴空間の各成分、つまり、ステップS415で算出した特徴ベクトルの各成分をホスト60に送信する。これは、上述のように、識別器の検証やメンテナンス等のために行われる。ステップS421を終了すると、このノード分散処理を終了する。

【0189】

この実施例によれば、人間とのコミュニケーション時のロボット10の触覚情報を触覚インタラクションデータベース78に蓄積し、これを部分空間法で解析することによって、触覚インタラクションの識別器を構成し、コミュニケーション時の触覚注目点を求めるとともに、触覚情報の分散処理を行うためのセンサ群の切れ目を求めるようにした。したがって、多数の触覚センサエレメント58で全身を覆われたロボット10において、触覚情報の分散処理を実現することができる。これにより、触覚センサ76の各ノード80からは、各触覚センサエレメント58の時系列データをホストCPU60に送信する必要がなく、分散処理で情報量の少ないデータを生成することができるので、ホストCPU60に送信する情報量を減らすことができる。また、ホストCPU60で膨大な触覚情報を処理する必要がないので、ホストCPU60として能力の低いものを使用することができ、つまり、低コストに抑えることができる。さらに、識別器によって予期される触覚インタラクションを識別することができるだけでなく、予想外の触行動（触覚センサ76への予想外の入力）が行われたことも把握することができる。

【図面の簡単な説明】

【0190】

【図1】この発明の一実施例のコミュニケーションロボットを示す図解図である。

【図2】図1実施例のコミュニケーションロボットに用いる皮膚とその中に埋め込まれる触覚センサエレメントを示す図解図である。

【図3】図1実施例のコミュニケーションロボットの電氣的構成の一例を示すブロック図である。

【図4】触覚センサの電氣的構成の一例を示すブロック図である。

【図5】触覚インタラクシオンデータベース構築実験で用いられたシナリオを示す図解図である。

【図6】図5の実験にこの発明の識別手法を適用した結果として15のインタラクシオンのクラスの認識率を示す図解図である。

【図7】図5の実験にこの発明の識別手法を適用した結果として15のインタラクシオンのクラスの誤認識率を示す図解図である。

【図8】図5の実験から最大特異値に対応する正規直交ベクトルより作成した体性感覚マップを示す図解図であり、図8(A)はクラス8の「よしよしして」の場合を示し、図8(B)はクラス11の「こちょこちょして」の場合を示す。

【図9】分散処理テーブルの作成処理の動作の一例の一部を示すフロー図である。

【図10】図9の続きを示すフロー図である。

【図11】分散処理テーブルの作成例の説明のための簡略化した触覚センサを示す図解図である。

【図12】図11の触覚センサのための或るクラスの識別関数テーブルの一例を示す図解図であり、図12(A)は識別関数テーブルDFを示し、図12(B)は近似識別関数テーブルDF*を示す。

【図13】図11の触覚センサのための或るクラスセットの転送経路テーブルTDの一例を示す図解図である。

【図14】図13の転送経路テーブルTDから作成された転送量に関するテーブルの一例を示す図解図であり、図14(A)は転送量テーブルTRを示し、図14(B)は転送負荷テーブルTRSを示す。

【図15】図14から調整した転送量に関するテーブルの一例を示す図解図であり、図15(A)は調整した転送量テーブルTR*を示し、図15(B)は調整後の転送負荷テーブルTRS*を示す。

【図16】ノードのテーブル更新処理の動作の一例を示すフロー図である。

【図17】ホストCPUによって実行される触覚インタラクシオンの識別処理の動作の一例の一部を示すフロー図である。

【図18】図17の続きを示すフロー図である。

【図19】ノードの分散処理の動作の一例を示すフロー図である。

【図20】ノードのデータ交換処理の動作の一例を示すフロー図である。

【符号の説明】

【0191】

- 10 ... コミュニケーションロボット
- 24 ... 皮膚
- 58 ... 触覚センサエレメント
- 60 ... CPU
- 64 ... メモリ
- 68 ... センサ入力/出力ボード
- 76 ... 触覚センサ
- 78 ... 触覚インタラクシオンデータベース
- 80 ... ノード
- 86 ... プロセッサユニット

10

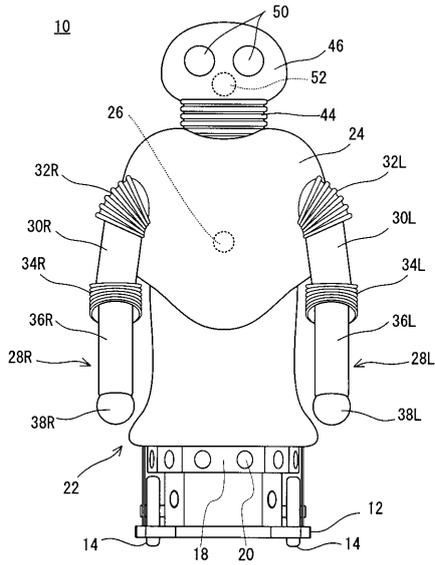
20

30

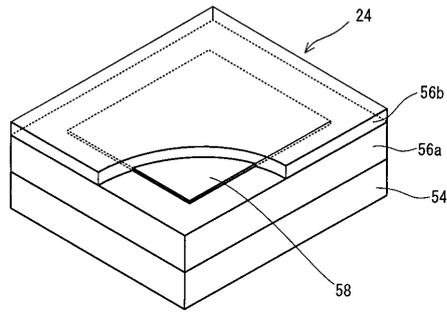
40

50

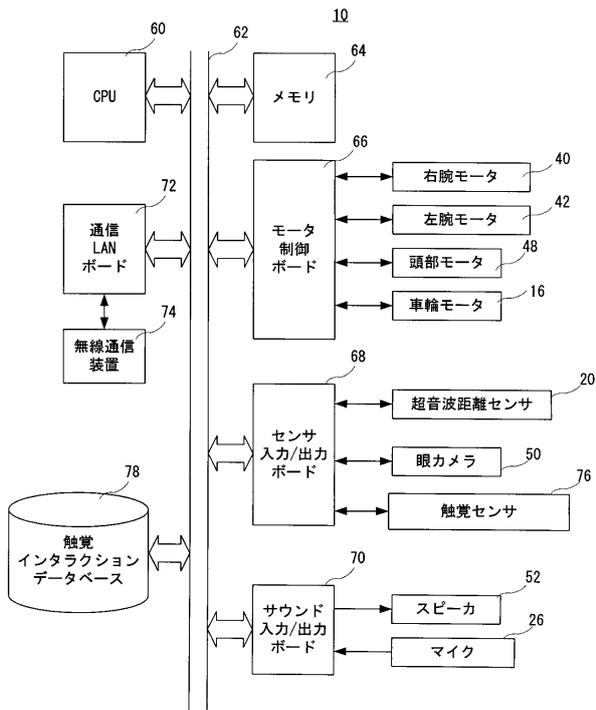
【図1】



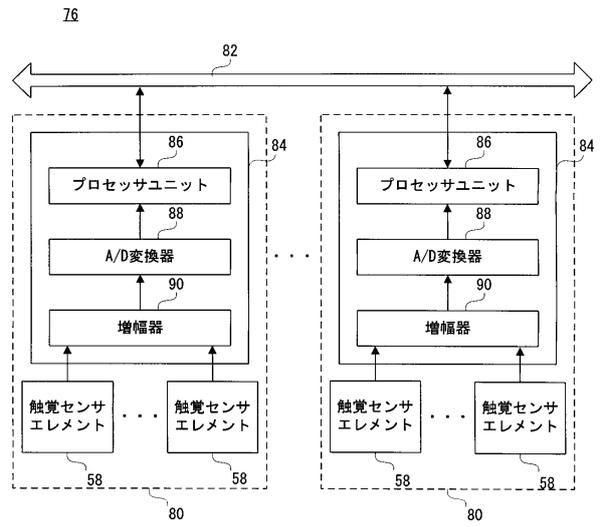
【図2】



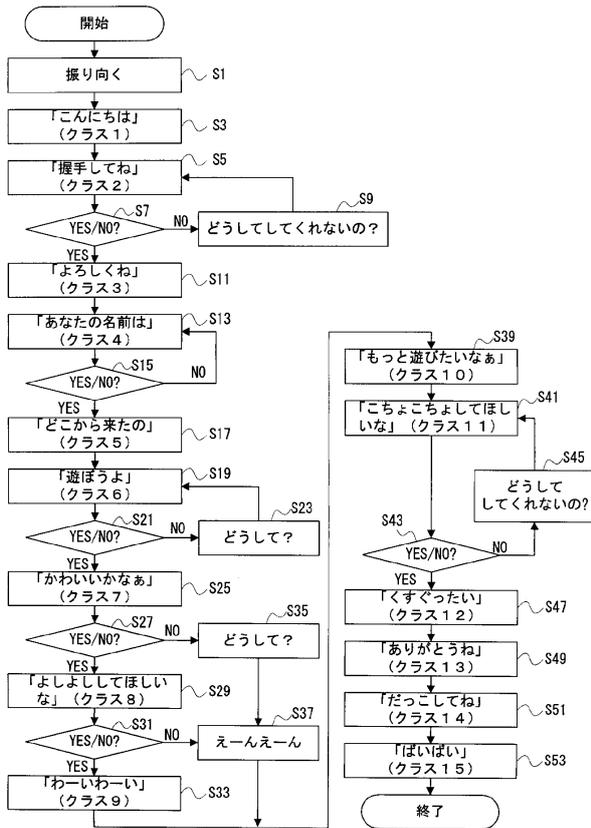
【図3】



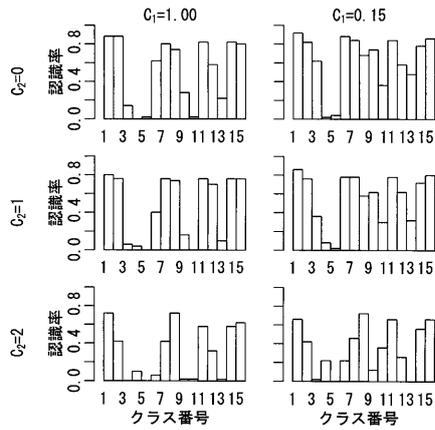
【図4】



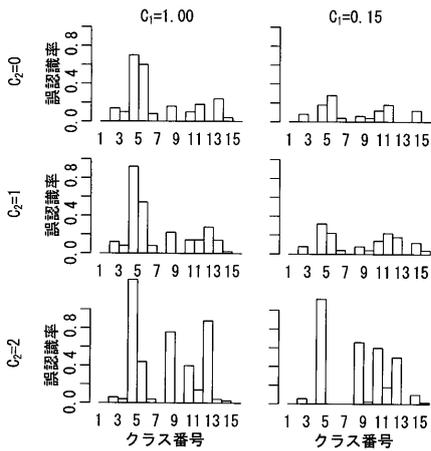
【図5】



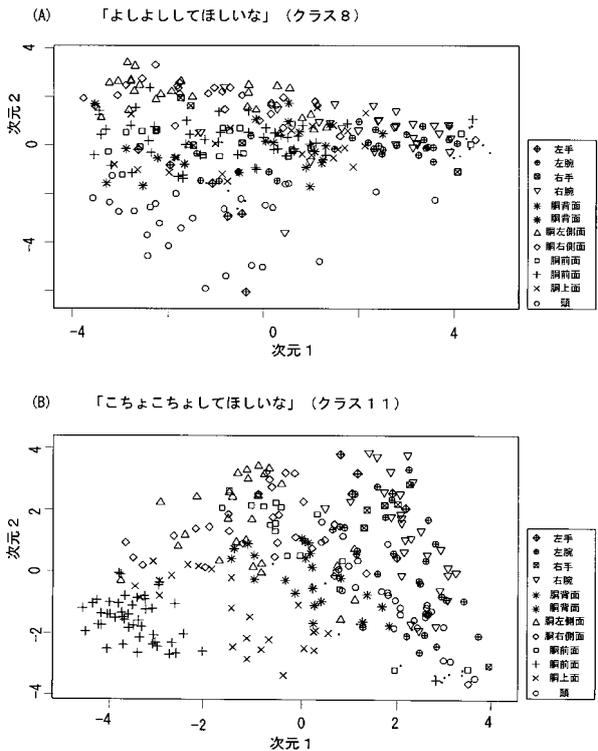
【図6】



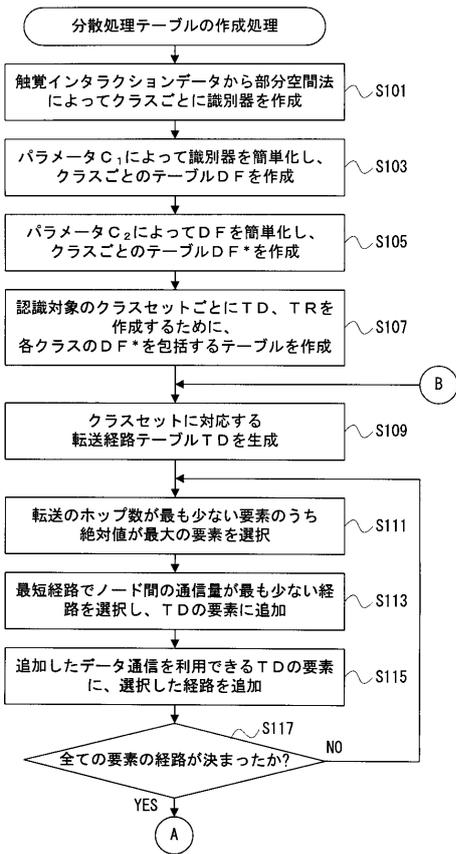
【図7】



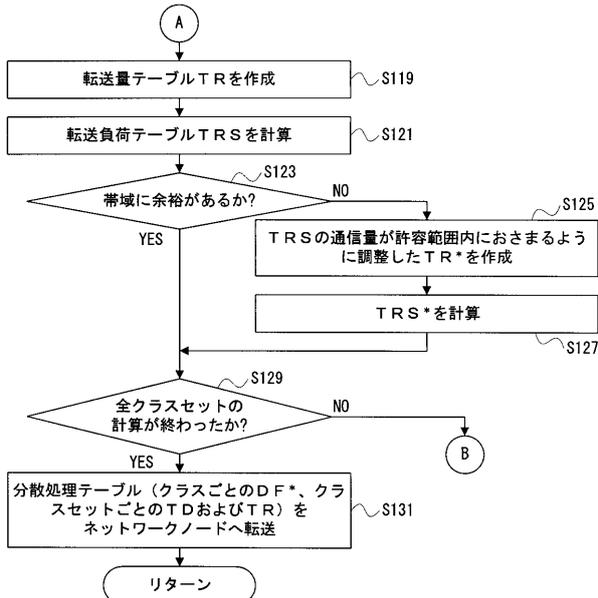
【図8】



【図 9】



【図 10】



【図 12】

(A) 識別関数テーブルDF

ノード	A			B			C		
センサ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	0.8	0.7	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
	2		0.9	0.7	-0.7	-0.4	0	0.1	-0.2
	3			0.9	0.6	0.4	-0.5	0.2	0.1
B	4				-0.9	0.4	0.2	0.4	0.5
	5					0.9	-0.4	0.4	0.4
	6						0.9	0.5	0.5
C	7							0.9	-0.4
	8								0.9
	9								

(B) 近似識別関数テーブルDF*

ノード	A			B			C		
センサ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	0.8	0.7	0.3	0	0	0.3	0	0
	2		0.9	0.7	-0.7	-0.4	0	0	0
	3			0.9	0.6	0.4	-0.5	0	0
B	4				-0.9	0.4	0	0.4	0.5
	5					0.9	-0.4	0.4	0.4
	6						0.9	0.5	0.5
C	7							0.9	-0.4
	8								0.9
	9								

【図 13】

転送経路テーブルTD

ノード	A			B			C		
センサ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	AA	AA	BA1	0	0	CB3/BA2	0	0
	2		AA	BA1	AB2	AB2	0	0	0
	3			AA	AB1	AB1	AB1	CB3/AB1	0
B	4				BB	BB	0	CB2	CB1
	5					BB	BC2	BC2	CB1
	6						BC1	BC1	BC1
C	7							CC	CC
	8								CC
	9								

【図 14】

(A) 転送量テーブルTR

ノード	A			B			C		
センサ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	0	0	100	0	0	100/100	0	0
	2		0	100	100	100	0	0	0
	3				100	100	100	100/100	0
B	4				0	0	0	100	100
	5					0	100	100	100
	6						100	100	100
C	7							0	0
	8								0
	9								

(B) 転送負荷テーブルTRS

ノード	A	B	C
A	2	0	0
B	2	2	2
C	0	3	0

【図 15】

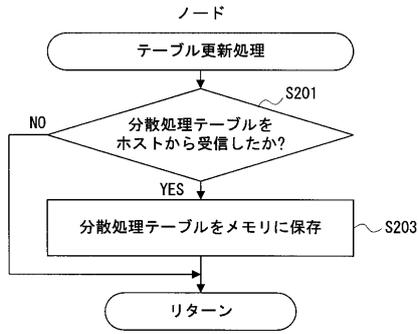
(A) 調整した転送量テーブルTR*

ノード	A			B			C		
センサ番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	0	0	100	0	0	50/50	0	0
	2		0	100	100	100	0	0	0
	3				100	100	100	50/100	0
B	4				0	0	0	100	100
	5					0	100	100	100
	6						100	100	100
C	7							0	0
	8								0
	9								

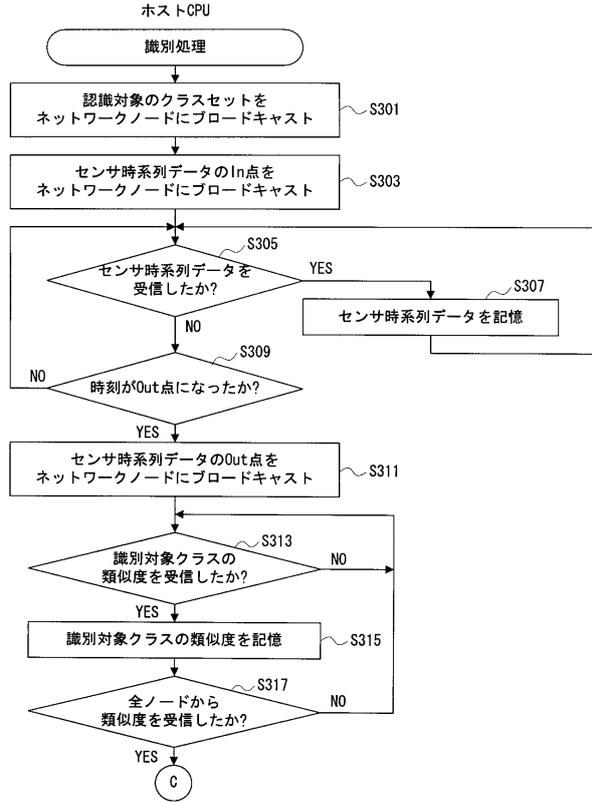
(B) 調整後の転送負荷テーブルTRS*

ノード	A	B	C
A	2	0	0
B	1.5	2	2
C	0	2.5	0

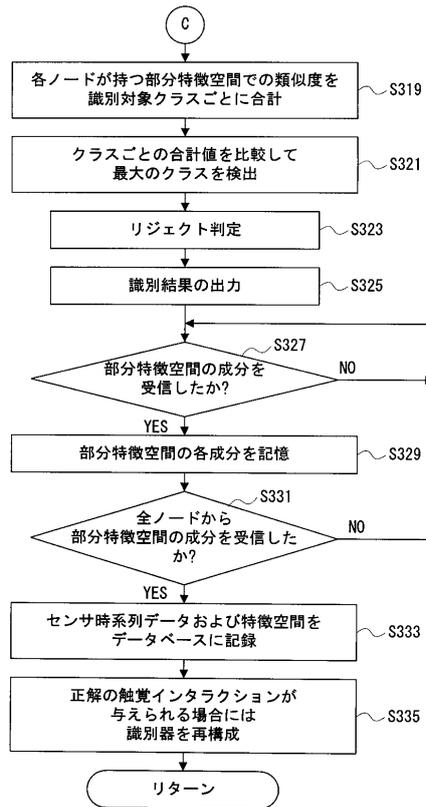
【図16】



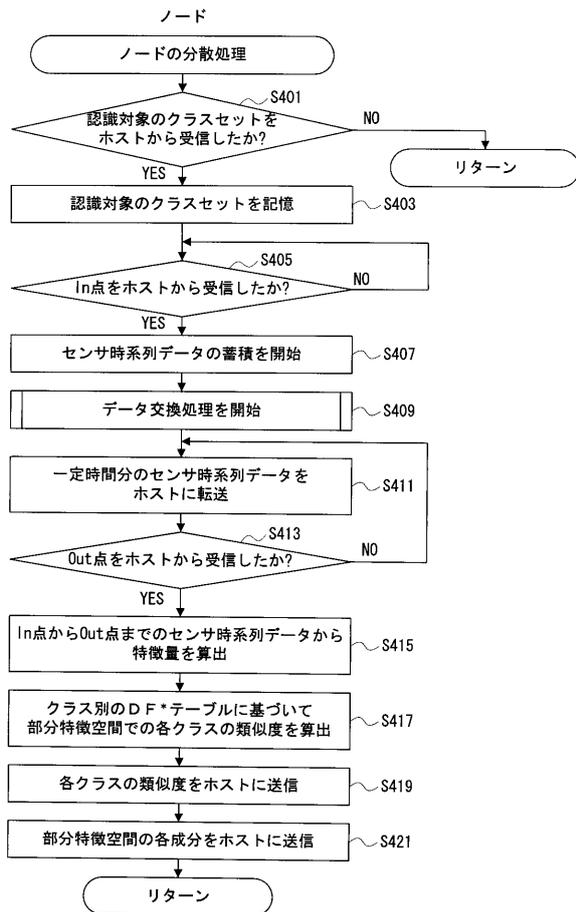
【図17】



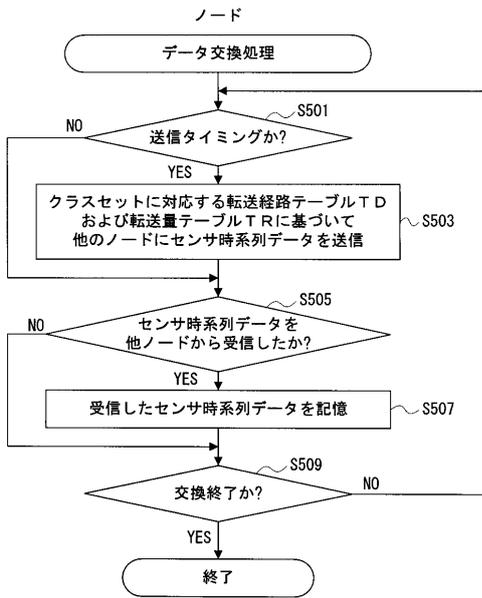
【図18】



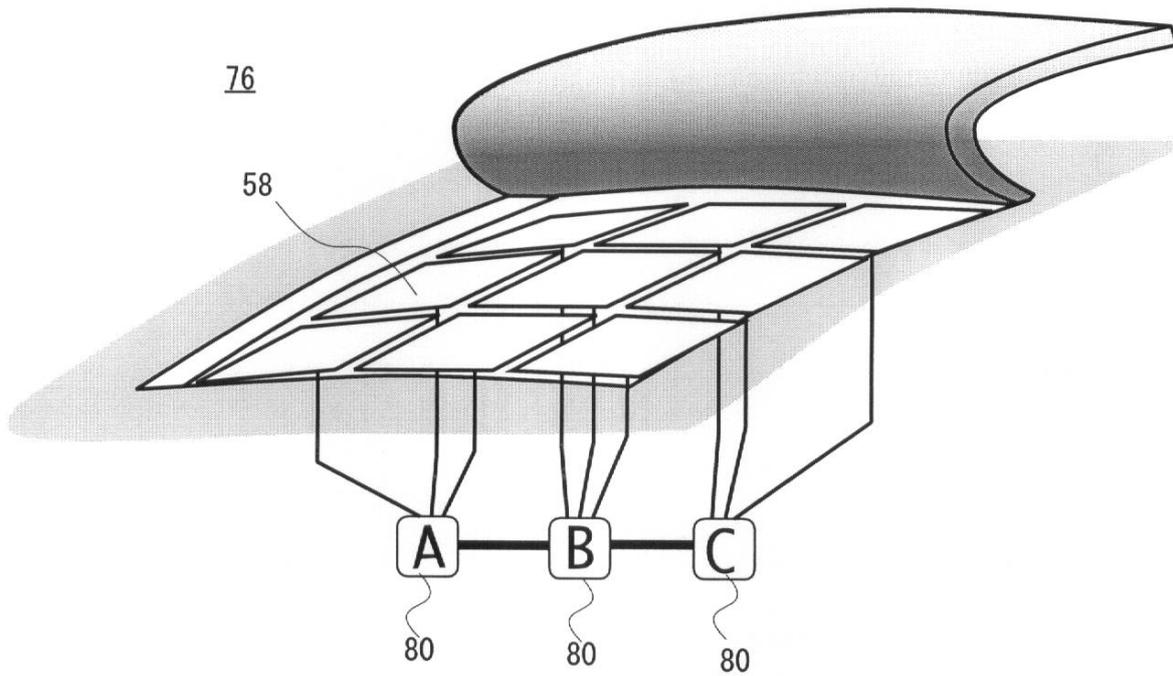
【図19】



【図 20】



【図 11】



フロントページの続き

(72)発明者 萩田 紀博

京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内

審査官 松浦 陽

(56)参考文献 特開2000-163515(JP,A)

特開2005-339186(JP,A)

特開2004-188535(JP,A)

特開2006-287520(JP,A)

特開2008-046903(JP,A)

野田智之, 宮下敬宏, 石黒浩, 自己組織化可能なセンサネットワークによる高密度皮膚センサの実現, 報処理学会関西支部支部大会講演論文集, 日本, 2004年10月, pp.121-124

野田智之, 宮下敬宏, 石黒浩, 高密度皮膚センサを有するロボットのための自己組織化センサネットワーク, 第5回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, 2004年12月, p.541-542

Tomoyuki Noda, Takahiro Miyashita, Hiroshi Ishiguro, Norihiro Hagita, Map Acquisition of Haptic Interaction using Cross Correlation between Distributed Tactile Sensors on the Whole Body Surface, 第1回 浅田共創知能システムシンポジウムの発表タイトル, 日本, 2007年7月, ポスタP-14, 会場: 兵庫県立淡路夢舞台国際会議場(兵庫)

Noda, T.; Miyashita, T.; Ishiguro, H.; Hagita, N., Map acquisition and classification of haptic interaction using cross correlation between distributed tactile sensors on the whole body surface, Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on, 米国, IEEE, 2007年10月29日

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B25J 1/00 - 21/02

G06F 9/50

G06F 13/36