

## 植物生体電位信号を用いたユビキタス多機能センサーシステム

久野 敦司      大野 広視      中沢 実      服部 進実

金沢工業大学大学院知的創造システム専攻

〒105-0002 東京都港区愛宕 1-3-4 愛宕東洋ビル 12F      TEL : 03-5777-2227      FAX : 03-5777-2226

E-mail : patentisland@hotmail.com , hiromi\_oono@infor.kanazawa-it.ac.jp ,

hattori@infor.kanazawa-it.ac.jp , nakazawa@infor.kanazawa-it.ac.jp

ユビキタスセンサネットワークの多くの研究は、多数のセンサをインターネットに接続するために、無線ネットワークを用いている。しかし、現状のユビキタスセンサネットワークは我々の社会に大きな問題をもたらす可能性がある。もし、多種類のセンサが我々の社会のいたる所に配置されると、我々はプライバシーを保てなくなる。

そこで、本稿では植物をセンサとして用いることで、この問題を解決できることを提案する。植物の出力信号は植物にとっての教師としての役割を果たす人間によって実行される学習プロセスの実行によってのみ、センシングデータとすることができると考える。すなわち、植物は人間の協力無しには、センシング能力を得ることができないのである。もし、人間によって十分な個数の植物にセンシング能力が与えられたならば、複数のセンサ出力に対する多数決論理によって生成される教師データを用いた学習によって、そのセンシング能力を維持できることについて提案する。

### A multi-functional sensor system that uses a bio-electric potential of plant

Atsushi Hisano      Hiromi Ohno      Minoru Nakazawa      Shimmi Hattori

Kanazawa Institute of Technologies Post Graduate School , Systems for Intellectual Creation

Atago Toyo Building 12F, 1-3-4, Atago, Minato-ku, Tokyo 105-0002, Japan

Phone: +81-3-5777-2227      Fax: +81-3-5777-2226

E-mail : patentisland@hotmail.com , hiromi\_oono@infor.kanazawa-it.ac.jp ,

hattori@infor.kanazawa-it.ac.jp , nakazawa@infor.kanazawa-it.ac.jp

Almost of researches about a ubiquitous sensor network uses a wireless network that connects many sensors with Internet. But there may be big problems on this ubiquitous sensor network for our human society. If many kinds of sensors are deployed everywhere in our society, we can not keep our privacy. If we use a plant as a sensor, we are able to solve this problem, because the output signal from plant can be used as a sensing data only after a learning process that is performed by a human who acts as a teacher for a plant. So, a plant can not have a sensing ability without human's cooperation. If enough number of plants is given a sensing ability by human, the sensing ability can be maintained by learning process with the teaching data that is generated by majority logic on a plurality of sensor outputs.

#### 1. はじめに

ユビキタスセンサネットワークは、監視社会をつくるものであってはならない。ユビキタスセンサネットワークは、便利さだけではなく、驚きと楽しさを与えるものでなければならぬと考える。その意味で、植物をセンサとするユビキタスネットワークは大きな価値があると考え、この研究を行なった。

#### 2. 背景と目的

宮本[1,2]らによれば、葉面電位が照明光や植物の葉の枯死の状態にも関係があることを示している。さらに、中村[3]らは、照明点滅や土壌水分に植物生体電位が反応することを示している。これらは、植物が環境センサとして活用できる可能性を示唆している。

しかし、これらにおいては植物の生体電位信号に知識情報処理を応用して、多機能センサとすることは示されていない。

また、ユビキタスセンサネットワークでは、多様なセンサを広い範囲に配置し、無線ネットワークに結合するということが指向されている[4]。しかし、人々の生活のあらゆる場所に人工的なセンサが多数配置されている状況は、質問に対する回答をユビキタスネットワークが自動生成するというサービス[5] が実現できたとしても、人々の心にとって悪影響を与えることが懸念される。そこで、植物をセンサとして用いるユビキタスセンサネットワークを提案する。

研究の目的は、下記のとおりである。

(1) 植物の生体電位信号を知識情報(判別ツリー、特徴量合成パラメータ)を用いて処理して、様々なセンシングを行なう多機能センサとする。

(2) 多機能センサとしては、照明センサ、温度センサ、接触センサ、人間接近センサ、感情または思考センサを想定している。

(3) 複数の「植物+知識情報処理」の出力するセンシングデータを多数決論理に入れ、多数決論理の出力を教師信号として、知識情報のチューニングを行うことで、植物の特性が変化しても知識情報をそれに応じて調整することで、センシング機能の恒常性を維持することが可能なことを示す。

### 3. コピキタス多機能センサーシステムの概要

(1) 機能概要: 植物の生体電位信号波形をAD変換してコンピュータに取り込む。取り込んだ信号波形から抽出された特徴ベクトルを用いて判別ツリーを探索して対応するカテゴリー符号を求める。このため、判別ツリーを学習によって生成する。これが、個々の植物のための動作である。複数の植物に対応するコンテキスト符号を多数決論理に入力し、多数決論理の出力を正しい値として教師データに用いて学習を行ない、知識データの更新を行なう。

#### (2) 概要と特徴

ハードウェア環境: ゲル付きの電極を有する植物生体信号計測用の同軸ケーブル, アナログ入力インタフェースボード, PC

ソフトウェア環境:

- 植物の表面電位信号から特徴量を抽出するソフトウェア、
- 特徴量の入力を受けて、その特徴量に対応するコンテキスト符号を生成する認識ソフトウェア、
- 認識ソフトウェアを動作させるために用いる判別ツリー生成の学習ソフトウェア、
- 複数の植物の信号から得たコンテキスト符号の多数決論理で教師信号を生成するソフトウェア

本システムの特徴は以下のとおりである。

(1) 植物の出力信号のパターン認識を判別ツリーを用いて行なう事で、種々な複数のセンサとなす点。

(2) 判別ツリー生成における特徴量評価アルゴリズムが、従来の「情報量を用いることで評価する方法」に比較して、計算量が非常に小さくなっている。

(3) 複数の植物をネットワークに結合することで、多数決論理によりセンサ植物の認識能力の恒常性維持のための学習が出来る点。

(4) これまでのセンサーでは検知できなかった信号が検知できる可能性がある。

### 4. システムの全体像

複数個の植物に、それぞれ生体電位計測のための電極を装着する。植物の葉または茎の表面に装着した電極と、植木鉢の中の土に設置した電極の間の電位の時間波形を、AD変換器でAD変換してPCに入力する。

この電位波形から複数種類の特徴量を抽出して、特徴ベクトルとする。この特徴ベクトルに、植物の周囲の状況表現するためのカテゴリー符号を対応付けて、教師信号とする。多数の教師信号を用いて、判別ツリー生成処理によって、判別ツリーを状態認識用知識として生成する。その結果、植物の生体電位信号から抽出された特徴ベクトルを判別ツリーに作用させて、状態を表現するカテゴリー符号を出力することができるようにする。

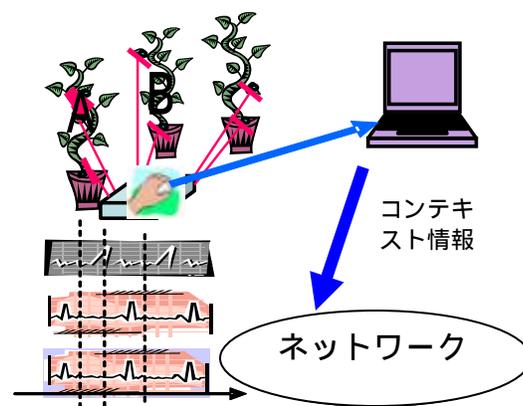


図1 システム外観

状態認識処理機能, 知識情報の学習機能, 状態認識用の知識情報と植物の組(以下、知識化植物と言う)は、さまざまなセンシング機能を実現する。

しかし、植物は生物なので、環境変化の影響や時間の経過の影響によって、状態への応答特性が変化する。植物の応答特性が変化しても、植物と知識情報の組である知識化植物で実現できるセンシング機能の恒常性を維持することが、植物の生体電位信号を用いたセンサには必須である。

このセンシング機能の恒常性維持のためには、植物の特性変化を補償するように、知識情報を修正しなければならない。この知識情報の修正には、教師信号が必要である。しかし、常に人間だけが教師信号を入力する方法で、植物の特性変化を補償する知識情報を生成する事は、人間の負担が大きすぎる。そのため、人間が教師信号を与えないでも、教師信号が得られる方式が必要である。植物の周囲の状態を表わすカテゴリ符号を人間が入力することで、人間を教師として知識情報を形成した知識化植物が3個以上形成できれば、例えば、知識化植物の出力の多数決論理によって教師信号を形成できるようになる。

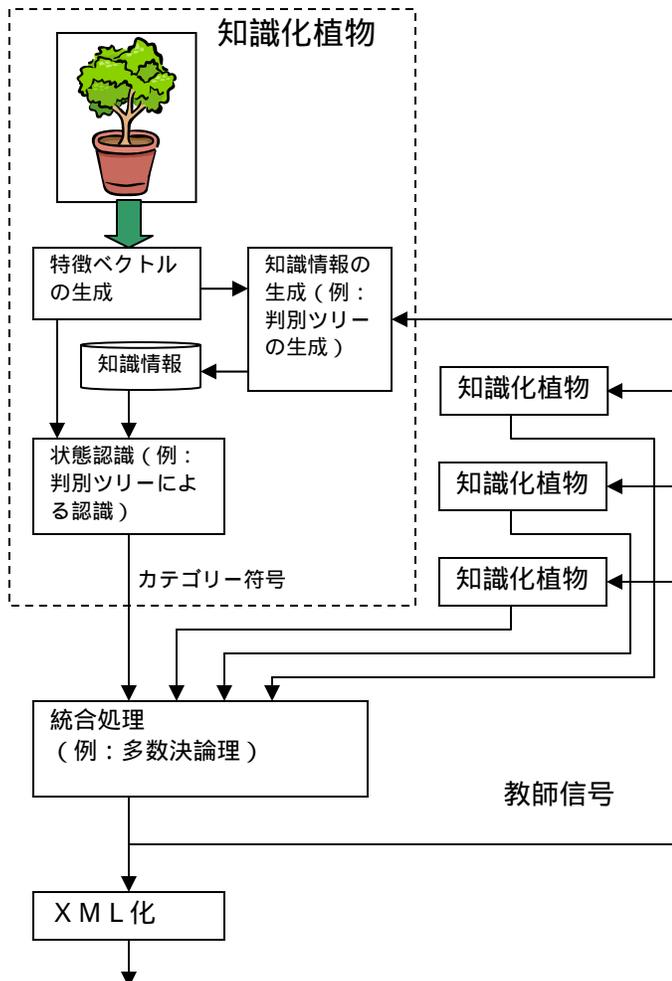


図2 センシング機能の恒常性維持

知識化植物の群において、各知識化植物の出力するカテゴリ符号を統合処理することで、確実度の高いカテゴリ符号を生成する。統合処理には、多数決論理、平均値処理などがある。統合処理が出力するカテゴリ符号を、真の値であるとして、各知識化植物における知識情報の学習において用いると、植物の特性変化があったとしても、知識化植物の出力するカテゴリ符号の確実度が維持できるように、知識情報が調整される。知識情報の学習には、判別ツリーの生成を用いることもできるし、誤差を前段に逆伝播させる多層構造のニューラルネットワーク[6],[7]を用いることもできる。また、識別関数の学習の機能を用いることもできる。今回は、判別ツリーの生成を用いた。

前記のように植物をセンサとして用いる場合のみならず、通常のセンサでも、センサと、センサ出力をカテゴリ符号に変換する判別機能（知識情報付き）の組み合わせである知識化センサを用いて、センサの特性変化を補償する仕組みが得られる。他の知識化センサが同じ対象物をセンシングして、カテゴリ符号を生成し、それを多数決論理に入れて、教師データを生成する。各知識化センサはセンサ出力をもとに生成するカテゴリ符号が多数決論理の出力するカテゴリ符号に一致するように知識情報を学習機能によって調整する。このようにして、人間が教師データを入力しなくても、システムはセンシング特性の恒常性を維持することができる。

## 5. 特徴量ベクトルの生成

判別ツリーの生成時、判別ツリーによるカテゴリ判別時に用いる特徴ベクトルは、次のようにして生成する。A/D変換ボードから入力した波形から、次のようにして特徴量を複数個抽出する。そして、これらをまとめて、特徴ベクトルとする。展開対象として入力される波形データを、 $s(i)$ とする。ここで、しきい値  $TH * k$  により  $s(i)$  を2値化して得た2値データを次式で示す。pbinaryはプラス側、mbinaryはマイナス側の2値データ波形である。

$$pbinary(k,i) = \begin{cases} 0 & , \text{ if } s(i) < TH * k \\ 1 & , \text{ if } s(i) \geq TH * k \end{cases}$$

$$mbinary(k,i) = \begin{cases} 0 & , \text{ if } s(i) > -TH * k \\ 1 & , \text{ if } s(i) \leq -TH * k \end{cases}$$

そうすると、波形データ  $s(i)$  の展開は、次式で表現できる。

$$s(i) = \sum_{k=1}^N (pbinary(k,i) - mbinary(k,i)) * TH$$

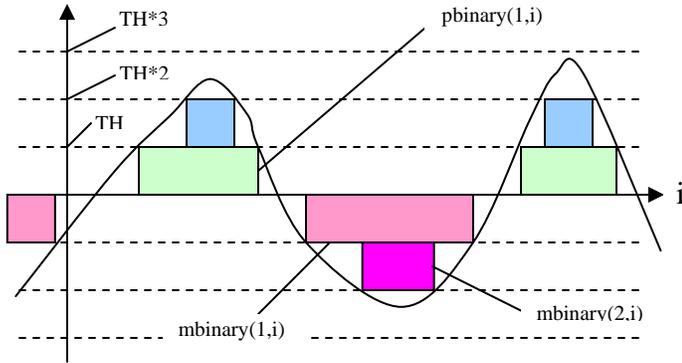


図3 波形データの階段表現

このように、pbinary, mbinary には元の波形データ  $s$  を復元できる能力があるので、pbinary, mbinary をランレングスコーディングして得た特徴量は、元の波形データを表現するものとなる。

pbinary(k,i) のランレングスコーディングデータは、 $ph[k][j]$  との配列に入れる。  
mbinary(k,i) のランレングスコーディングデータは、 $mh[k][j]$  との配列に入れる。

レベル  $k$  のランレングス符号：

$ph[k][j]$  = 正の値：第  $j$  番の連続区間が、pbinary(k,i) が値 1 を有する区間である場合の、区間長さ  
負の値：第  $j$  番の連続区間が、pbinary(k,i) が値 0 を有する区間である場合の、区間長さ  
0：データ区間終了の符号

$mh[k][j]$  = 正の値：第  $j$  番の連続区間が、mbinary(k,i) が値 1 を有する区間である場合の、区間長さ  
負の値：第  $j$  番の連続区間が、mbinary(k,i) が値 0 を有する区間である場合の、区間長さ  
0：データ区間終了の符号

このようにしてデータ圧縮された波形から、各レベルのランレングス列を特徴量として、採用して、特徴ベクトルを形成した。

## 6. 判別ツリーの生成

複数個の特徴量の組からなる特徴ベクトルに、その特徴ベクトルの先端の位置に応じたカテゴリー符号を対応させて、教師データを作成する。この教師データをもとに、判別ツリーを生成する。各カテゴリー符号ごと、特徴軸ごとに、特徴量の分布を最大値、平均値（中心）、最小値の組（以下、スティックと呼ぶ）で表現して、判別ツリーの生成のための特徴軸評価と、しきい値の決定を行なう。特徴量分布をスティックで表現することで、特徴軸の評価としきい値選択のための計算量が大幅に削減できる。

このように定義したスティックを用いて、次の考え方で特徴軸ごとに分離位置を少しずつ変化させながら、下記の値  $V1$ ,  $V2$ ,  $V3$ ,  $V4$  を求め、それから評価値  $V$  を算出する。

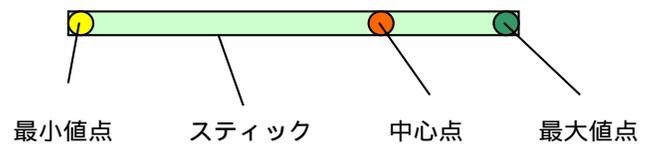


図4 スティック

$V1$ ：分離位置からのスティックの距離を示す。スティックはできるだけ分離位置から遠いほうが、スティックの分離がうまくできる。したがって、各スティックの中心点、最大値点、最小値点の分離位置からの距離の総和を  $V1$  とする。

$V2$ ：分離位置でのカテゴリー分離で得られる情報量が大いほど小さくなる値である。分離位置を中心にスティックの平均値点、最大値点、最小値点が正側/負側にできるだけ対称に分布している方が良いので、 $((平均値点 - 分離位置) + (最小値点 - 分離位置) + (最大値点 - 分離位置))$  を全スティックについて合計した値の絶対値を  $V2$  とする。

$V3$ ：カテゴリーの広がり幅である。各カテゴリーの幅が小さいほうが良いので、各カテゴリーの幅の合計値を  $V3$  とする。

$V4$ ：カテゴリーが、分離位置で分断される度合いを  $V4$  とし、総合評価値から減算する。

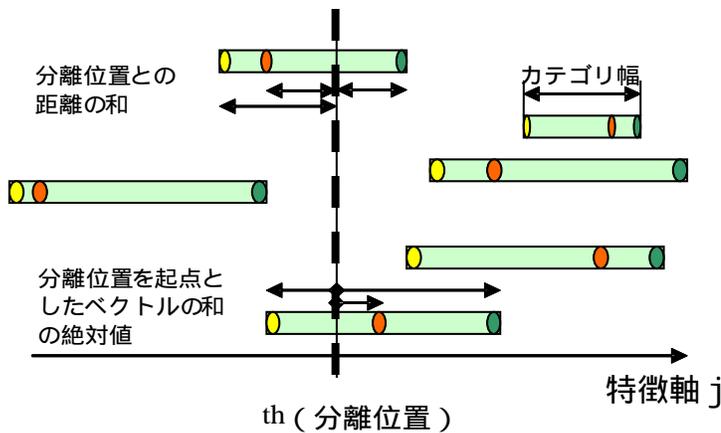


図5 分離位置と評価値

第  $i$  番の特徴ベクトルにおける特徴軸  $j$  の特徴量の値を、 $V_{ec}(i, j)$  とする。  
 この  $V_{ec}(i, j)$  に付与されたカテゴリ符号を、 $C(i)$  とする。ただし、 $N$  をサンプル数とすると、 $i = 0 \sim N - 1$  となる。  
 ここで、カテゴリ符号の種類が、 $K(0) \sim K(m-1)$  までの  $m$  個あったとすると、 $C(i)$  の値は  $m$  種類のカテゴリ符号のどれかとなる。

特徴軸  $j$  に注目すると、第  $i$  番のサンプルの値は、 $V_{ec}(i, j)$  となり、 $i = 0 \sim N - 1$  となる。  
 付与されたカテゴリ符号の種類別に、特徴量  $V_{ec}(i, j)$  をグループ化し、各グループごとに、最小値、平均値、最大値を求め、それらを組にして、スティックとする。

$K(s)$  とのカテゴリ符号を付与されたスティックにおける最小値、平均値、最大値をそれぞれ  $Min(s)$ 、 $Ave(s)$ 、 $Max(s)$  とする。  
 そして、分離位置を  $th$  とすると、特徴軸  $j$  を分離位置  $th$  で区分することの評価値  $V$  (大きいほど良い) は、次式で算出される。

$$V = V_1 - V_2 - V_3 - V_4$$

$V_1, V_2, V_3, V_4$  の算出式は次のとおりである。

$$V_1 = \sum_{s=0}^{m-1} \{ |Min(s) - th| + |Ave(s) - th| + |Max(s) - th| \}$$

$$V_2 = \left| \sum_{s=0}^{m-1} \{ (Min(s) - th) + (Ave(s) - th) + (Max(s) - th) \} \right|$$

$$V_3 = \sum_{s=0}^{m-1} \{ Max(s) - Min(s) \}$$

$$V_4 = \sum_{s=0}^{m-1} d(s)$$

ただし、 $d(s)$  は、以下の如く算出される。

$$d(s) = \begin{cases} |Min(s) - th| & , \text{ if } Ave(s) > th \\ |Max(s) - th| & , \text{ if } Ave(s) \leq th \end{cases}$$

$th$  を変化させながら求められる最大の  $V$  を与える特徴軸の番号  $j_{best}$  と分離位置  $th_{best}$  の組 ( $j_{best}, th_{best}$ ) が、判別ツリーでの中間ノードを与える。

すなわち、特徴軸  $j_{best}$  において、特徴量が  $th_{best}$  以上となる値を持つサンプル群と、特徴量が  $th_{best}$  未満となるサンプル群の2つに分割する。そして、サンプル群が単一のカテゴリのものからなるまで、各サンプル群ごとに、最良の特徴軸と分離位置の組を求め、サンプル群を分離位置で区分することを繰り返す。これによって、図6に示すような判別ツリーが形成できる。判別ツリーは、カテゴリ符号 (例:  $C1$ ) を記述したノードで終端される。

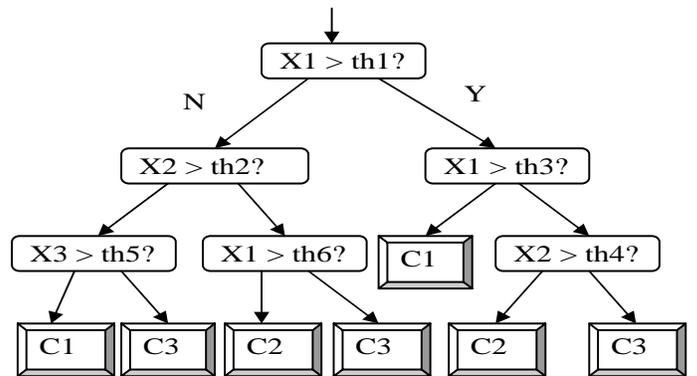


図6 判別ツリー

## 7. 実装方法

### 7.1 対象の植物

マイナスイオンを発生するサンセベリア・サンスベリア、電磁波を吸収サポテンであるセレウス・ペルービアナス、ペゴニア

### 7.2 ハードウェア

対象の植物の生体電位計測に用いる電極としては、日本光電のディスポ電極 (導電性粘着ゲルを採用したもの) である  $V040M4$  を用いた。

電極を接続したケーブルには、同軸ケーブル  $3C2V$  を用いて、ノイズ対策をした。

同軸ケーブルは、株式会社インタフェース製の TRM-7101 AD 用 16 点 BNC コネクタボックスで集約して、AD 変換ボードに接続した株式会社インタフェース製の PCI-3165 16 ビット D8/S16 点高精度バス絶縁型 AD 変換ボードを、DELL のデスクトップ PC PRECISION 650 に装着した。

### 7.3 ソフトウェア

Windows XP 上で、Borland C++ を用いてプログラミングした。

## 8. 知識化植物群が出力するコンテキスト情報

知識化植物の複数の知識情報を切り換えることで、さまざまな種類のセンシングが可能となり、多機能センサを実現できる。例えば、温度に関しては、温度を、マイナス 5 度 C から 0 度 C 未満のカテゴリー、0 度 C 以上 10 度未満のカテゴリー、10 度以上 20 度未満のカテゴリーというように、温度範囲にカテゴリー符号を対応させて温度センサとして動作するための知識情報を学習させることもできる。

また、植物は人間の接近の影響を受けるので、適切な特徴ベクトルを用い、学習プロセスを経て、知識情報を生成すれば、人間の接近検知が知識化植物によって高精度にできるようになる可能性がある。

このように、様々なセンシング情報を知識化植物は出力できる。そして、通信ネットワークを介して多くの知識化植物、工業製品として実現しているセンサの情報を取り扱うためには、センシング情報の統一的なデータ形式が必要となる。また、物理的な情報だけでなく、例えば「危険」とか「さわやか」というような抽象的な情報を状態を表現するコンテキストとしても表現する必要性もある。状態を表現するコンテキストの体系を汎用性、拡張性の高い表現方式として、XML で実現する。ユビキタスセンサネットワークにおいて、1 組のセンシング情報を XML で表現するためのタグの体系を示す。

### (1) 共通項目

<センシング対象位置></センシング対象位置>

<データ有効半径></データ有効半径>

<センシング時刻></センシング時刻>

<データ有効時間></データ有効時間>

<精度></精度> <センサ位置></センサ位置>

<センサ装着対象></センサ装着対象>

<単位></単位>

### (2) 管理用データ項目

<センサ所有者></センサ所有者>

<センサ管理者></センサ管理者>

<センシング対象権利者></センシング対象権利者>

<利用許諾範囲></利用許諾範囲>

<データ利用料></データ利用料/>

### (3) センシングデータ種別

#### a. 物理レベルのセンシングデータ

<温度></温度> <圧力></圧力> <距離></距離>

<明るさ></明るさ> <加速度></加速度>

<速度></速度> <電流></電流> <電圧></電圧>

<電力></電力>

#### b. 抽象レベルのセンシングデータ

<危険度></危険度> <快適度></快適度>

<明瞭度></明瞭度>

### (3) 補助項目

<コンテキスト合成知識></コンテキスト合成知識>

## 9. まとめ

本研究では、特性が変化しやすいセンサとしての植物であっても、センサ出力を処理する知識情報を学習によって調整することで、センシング機能の恒常性が維持できることを示した。この事は、植物をセンサとして使用する場合のみならず、工業製品としてのセンサの特性変化への対応策としても活用できる。また、複数の知識化植物の出力を統合処理することで、センシング機能の恒常性維持を行なうための教師データが、自動的に生成できることも示した。

### 謝辞

本研究の遂行にあたり、植物生体電位計測などに関してご指導をいただきました金沢工業大学電気系の宮本紀男教授に感謝いたします。

### 参考文献

1) 大村、佐々木、深見、平間、宮本ほか：「植物葉面電位信号が示す法則性の解明とその応用」計測自動制御学会、生体生理工学シンポジウム論文番号 2C3-1 平成 7 年 12 月 19 日

2) 宮本紀男、深見正「植物が示す神秘的な電磁気現象」電学誌、113 巻 6 月号、1993 年 4 月 6 日 pp. 471-477

3) 富山大学中村研究室紹介

[http://www.neu.pu-toyama.ac.jp/nakamura\\_lab2004.html](http://www.neu.pu-toyama.ac.jp/nakamura_lab2004.html)

4) ユビキタスセンサネットワークの開発

[http://www.oki.com/jp/Home/JIS/Books/KENKAI/n200/pdf/200\\_R08.pdf](http://www.oki.com/jp/Home/JIS/Books/KENKAI/n200/pdf/200_R08.pdf)

5) 特許第 2605828 情報処理システム並びにファジィコンピュータ

<http://www.patentisland.com/Querybreakdown.pdf>

6) 特開昭 55-67874 号 (サイバネトロン)

1980 年 5 月 22 日公開

<http://www.patentisland.com/cybanetron.pdf>

7) D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams, "Learning internal representations by error propagation," D. Rumelhart and J. McClelland, editors. *Parallel Data Processing*, Vol.1, Chapter 8, the M.I.T. Press, Cambridge, MA 1986 pp. 318-362.