特集記事

共生ロボットによるヘルスケアシステム

寺田信幸, 秋元俊成

東洋大学生体医工学研究センター

The health care system with symbiotic robot

Nobuyuki Terada, Toshinari Akimoto

The Centre for the Biomedical Engineering Research, Toyo University

Key words: symbiotic robot, health care system, low-frequency pressure sensor, ear canal pressure, right heart function

Abstract: We are aiming to develop elderly-friendly living environment. For this purpose, we developed a symbiotic robot (SR) utilized as the health care system. In order to have the SR act as the interface with residential living space, we realized the housing operations controlled by a user's voice. The SR extracts the user's emotional information from his/her voice which controls the home operation, and changes its own color in accordance with his/her emotion. It can also speak the user's language using a voice-synthesis technology. The SR is also equipped with a biological information monitoring system for the health care of the elderly. This monitoring system performs non-invasive measurement for respiratory rate and heart rate using the low-frequency pressure sensor. This information is sent to the SR for analysis and recorded. According to our test, the result of measurements in respiratory rate and heart rate showed a good correlation with conventional methods, and we proved that it can be utilized as an index for physiological function. In addition, the ear canal pressure changes obtained from the user's ear plugs that are connected to the low-frequency pressure sensor showed unique changes. This ear canal pressure changes are found to be possible to reflect changes in jugular vein pressure or right heart hemodynamics. These data were expected to provide an important physiological evidence for the cardiac disease. This monitoring system can be applied to a practical use as a device for non-invasive diagnosis of right heart function.

抄録 我々は、高齢者にやさしい生活環境の構築を目指している。そのために、健康管理システムとしての機能を果たす共生ロボットを開発した。共生ロボットが生活空間である住宅とのインターフェースとしても機能するよう音声による住宅操作を実現した。共生ロボットは住宅を操作する音声から感情を抽出し、計測した情報を基に自分の色を変える。音声合成技術を利用してインタラクティブに話すこともできる。さらに、この共生ロボットに高齢者の健康を管理するための生体情報モニターシステムを搭載した。システムは低周波センサーを使用して呼吸数と心拍数を無侵襲に拘束の少ない状態で計測する。これらの情報は共生ロボットに送られ管理される。計測された心拍数と呼吸数は従来法による計測と良好な相関を示し、生理機能指標として十分使用できることを確認した。さらに、低周波の圧力センサーに接続されて

いる耳栓を着用して得られる外耳道の圧力変化は、非常に特徴ある変化を示した。この外耳道内圧変動は頸静脈圧の変動または右心血行動態を反映している可能性が見出された。これらのデータは、心臓疾患の重要な生理的エビデンスを提供する。このモニターシステムは、非侵襲で右心機能を診断する装置として実用化できると考えている。

キーワード：共生ロボット，健康管理システム，低周波圧センサー，外耳道内圧，右心機能

I. はじめに

近年の情報通信技術やロボット技術の進展は目覚ましく、先端研究から実用化に向けた実証研究まで様々な取り組みがなされている。また、超高齢化社会に向かい、生活習慣病対策として日常生活の中で健康を管理するヘルスケアシステムの開発も行われている。しかしながら、健康管理や見守りが必要である高齢者の多くは情報弱者でもあり、その恩恵を受けるに至っていないのが現状である。

そこで、我々は高齢者および生活習慣病の予防を望む人たちが、無理なく使用できるヘルスケアシステムの開発にロボット技術を導入し、人にやさしい生活環境の実現に向けた取り組みを行っている。居住空間とのインターフェイスとして人と共に暮らす共生ロボットを導入し、そのロボットに様々な機能を搭載することで、共生ロボットによる総合的なヘルスケアシステムを構築することを目指している（図1）。

II. 共生ロボットと居住空間の創造

1. 共生ロボット

家庭内に移動ロボットを導入する際には、周りの人間に安心感を持たせ、かつ安全に目的を果たすことが必要である。一方、ロボットは人と共生するにあたり、人間の情報と環境情報の取得を行わなければならない。そこで、利用者が移動ロボットに監視されているという不快感を無くすために、カメラではなくレーザーレンジセンサを使用することにした。レーザーレンジセンサをロボットに搭載し、人間検出及び追従を行った。人間検出にスキャンマッチングの技術を用いることで、人間検出と環境認識（地図作成）を平行して行うことを可能にした。これにより、ロボットは人間に追従して動くことが出来、人間の行動を把握することが出来る。同時に地図作成が行えるため、行動の詳細を解析することも可能となった¹⁾。

共生ロボットは住宅とのインターフェイスとして、居住者と住居の間を取り持つよう機能する。従来型のインテリジェントハウスでは、システムの主体、つまりホストは居住空間側であり、居住者はそれを利用する。そのため、居住者はサービスの提供者を把握しにくくなり、居心地の悪さを感じる。そこで、機能の主体を共生ロボットへ移行するため、音声認識による家電コントロール機能を共生ロボットに搭載し、居住空間とのインターフェイスとして機能させた。居住者は共生ロボットをサービス提供者として認識することにより、コマンドを発語する際など対象が明確化され、システムに話しかけることに違和感を持たなくなる。ロボットは搭載されたマイクが拾った音声を認識辞書に従ってテキスト化する。テキスト化された文章の中から「ブラインド」・「上げ」や「照明」・「つけ」などの言葉の組み合わせを検索し、実行可能な組み合わせの場合には、それに対応したコマンドを宅内LANに存在するコントロールサーバーに送信することで音声による家電制御を実現した。図2に共生ロボットによる家電コントロールの概要を示した。

日常生活において、人は相手の反応や現在の感情を推量する要素として、声の調子を聞き分けて用いている。これまでも音声から感情を測定する研究は報告されており^{2,3)}、システム化もされ利用されている。しかしながら、利用されている分野は、コールセンターやエンターテインメント分野に留まっている。これまで、ロボットといえば無機質・機械的なイメージが付随していた。しかしロボットが家庭の中へと入って行くとき、人とロボットが今まで以上に密な関係を築いていく必要がある。無機質さはその障害になると考えられる。同一空間で生活するうえでコミュニケーションは不可欠であり、コミュニケーションにおいての無機質・無反応は居住者に対して、ロボットへの不気味な印象からくる居心地の悪さを与え、関係不良の要因となりうる。

こうした背景から、音声からの感情解析技術をロボットとのコミュニケーションの中に利用し、ロボットが

図1 共生ロボットによるヘルスケアシステムの概念図

Fig. 1 Concept of the health care system with symbiotic robot

図2 共生ロボットによる家電コントロールの概要

Fig. 2 Overview of home appliances control with symbiotic robot

居住者に対して心理的要因を含んだレスポンスを行えるようにした。これにより、居住者のロボットへの感情移入を導き、良質な関係が築けるようになると考えた。ロボットは感情に応じ、あらかじめ音声合成によって生成された音声を居住者へ返す。このプログラムにおいては、怒り・ストレス・活力の3パラメータの状態に応じて色調を変化させ、さらに数サンプルに1度、同じ返答が連続しないように複数用意した応答音声の発話を行う。ロボットが居住者の状態に応じた返答を返すことで、ロボットという無機物的存在に対して、居住者の感情移入を容易にし、居住者とロボットとの関係を円滑にして共生を実現する。

これらの技術を一台のロボットに搭載し、計測した情報を基にロボットは移動し、ロボットの色を変化させたり、音声合成技術を利用してロボットから話しかける等、インタラクティブに対応できる共生ロボットを作製した。図3に共生ロボットの外観と音声から抽出した感情による色の変化と発話する内容の一部を示した。

2. 居住空間

平成20年3月に、実証実験の中心となる共生ロボットハウス建築と実験環境の整備を行った。人が実際に生活できる居住空間としての実験ハウスとそれをモニターする監視機能、実験用共生ロボットを試験するロボット工場の整備を行った。ホームITネットワークの組み込みや転倒検出システム、遠隔管理システムなど居住空間のロボット化に向けた技術開発を行った。人が高度なITシステムを意識することなく利用できるようにするために、人・情報・機械システムにおける共生を考えた生活支援環境を構築することを目指した。

前述の共生ロボットから住宅操作が行えるように住宅の整備を行うと共に、住宅側からロボットへの情報発信を行えるようにした。特に、お風呂場、トイレにおいてヒトが転倒した際にロボットに知らせるシステムの開発を行った。近年日本国内の死亡事故のうち、転倒や浴室

図3 共生ロボットの外観と色調変化

Fig. 3 The symbiotic robot appearance and color changing

での溺死など屋内事故による死者の数が、交通事故による死者の数を上回り、増加する傾向にある。これらの死亡事故の大半は老人の一人暮らし、家族や介護者が留守の間に発生しており、早期に発見することで死に至らなかった可能性のあるケースが多数含まれる。そこで、住宅内における転倒検出・通報システムの開発を行った。従来の研究ではカメラを用いる手法が多数報告されている⁴⁾。しかし、これらの手法は映像を取得するため、プライバシーの問題や使用者はカメラによって監視されているという精神的な負担が考えられる。そこで我々は距離データしか使わないレーザーレンジセンサを用いて転倒を早期発見するシステムの開発を行った。また、転倒を検出した際に共生ロボットから音声による通報を行い、同時にメールを送信し、家族や介護者に通報するシステムの開発も行った⁵⁾。

音声による家電コントロールシステムと音声の周波数、フォルマント周波数、話すスピード、話の間合い、強さなどの音声成分に分解し、解析することで、特定の感情における特徴的なシグナルの検出に成功した（前述の感情認識システム）。音声情報から感情を読み取り、その感情から心理的なストレス度合いの推定を試みた。音声解析による感情と心理学的な面でのストレス感情を関連づけ、音声の感情パラメータによりストレス状況の判定が可能かを検討した。心理的なストレスを感じているときは音声にも感情が現れる。ストレスの状況次第で異なる感情の組み合わせが現れることが分かった。つまり、音声から感情をパターン化し、ストレスの度合いを推定することは可能と考えられた。これらの情報を基に

図4 転倒検出システム

Fig. 4 Fall detection system

居住者の心理状況に応じてインタラクティブにインテリアを変化させるなど居住空間のロボット化を行った。

Ⅲ. 生体情報モニターの開発

生活習慣病対策として日常生活の中で健康を管理するヘルスケアシステムや高齢者を見守り健康管理するシステムの開発が望まれている。その際、無侵襲かつ人体の自由を損なうことの無い生体情報モニターが必要となる。心電図を日常生活の中で取る場合は、一般的に電極を胸に貼り付け、これにコードで繋がる小型心電計を、腰や肩ベルトを用いたキャリングケースに入れ携帯する。心電計自体は小型になってきているものの、体に電極を貼り付けることによるかゆみ、かぶれなどが問題で長時間の測定には不向きである⁶⁾。我々は、低周波圧センサーにより体振動情報を空気パッドの内圧変化として

図5 生体情報モニタリングシステム
Fig. 5 Biological information monitoring system

捉えられることでリアルタイムに呼吸、心拍に対応した信号を取り出すことに成功した⁷⁾。

1. 低周波圧センサーによる呼吸、心拍の計測

試作装置から得られる情報の意味付けと生理機能指標として確立するため解析アルゴリズムの検討、基礎データの取得、従来法との比較検討を行った。その結果、心拍、呼吸共に、従来法との相関も良好で生理機能指標として十分使用できることが確認された⁷⁾。エアパッドの装着部位に関する検討では、首、腕、胸、腰、尻等での計測が可能であった。長時間計測するためにはセンサーを小型化し、装着することが有効である。ただし、データの解析を行うためには大量な計算を必要とする。そこでセンサーで得られた計測データを無線によってサーバーへと転送し、解析をサーバー側で行うシステムを構築した。これにより、独居老人や老人世帯の「見守り」ロボットへの展開が可能となった。腕に装着して測定するタイプの試作装置を図5に示した。計測データはBluetooth通信によりPCに送られリアルタイムに解析され、集積される。

低周波圧センサーによる生体情報の測定は、体動が体表面に接触させている空気パッド内の空気層を介し、低周波圧センサーに伝わることで体動に含まれる生体情報が測定できる。(特許：生体情報取得システム 特願2007-86979 / 特開2008-237847) そのため、体動の影響を受けやすい。そこで最も動きの少ない頭部の外耳道内圧を測定することでこれら生体振動情報の安定取得を試みた。

図6 外耳道に低周波圧センサーを装着した外観
Fig. 6 Appearance of low frequency pressure sensor device to the ear canal

2. 外耳道内圧測定

外耳道は耳の入り口から鼓膜までの管である。耳の入り口をイヤープースでふさぐことで一定の空気層が設けられ、それにより体内の振動(体動)がその空気層を介し、イヤープースに接続された圧力センサーに伝わり、体動を計測することが可能となる。この体動には、心臓からの拍動や呼吸による動き、咽頭部周辺の顎の動きや咀嚼・嚥下による振動などが含まれている。それらを適切な周波数帯域のフィルタで処理することにより、それぞれの生体情報として抽出を行った。インフォームドコンセントが得られた健康な男性8名で比較検討した所、心電図から得られた心拍数との相関も、相関係数0.96、回帰式 $y = 0.99x + 0.003$ と良好な結果が得られた。外耳道に低周波圧センサーを装着した外観を図6に示した。

図に示した耳栓状の装置を装着し、外耳道の内圧変化を低周波圧センサーで検出することにより得られる体振動から、心拍に対応した特長的な信号を取り出した。外耳道内圧変化を計測することにより得られる情報の意味付けと生理機能指標として確立するため、多角的な検討を行った。その結果、外耳道内圧変化から得られる生体情報は心拍情報のみならず、新たな生理的指標としての可能性が示唆された。心拍に同期した圧波形は動脈に起因し心電図のQRS波に同期した陽圧波形を想定していたが、図7に典型例で示したように実際には陰圧波形であった。心電図QRS波の後で第一心音に一致して急激な圧低下が観察された。これは右房の拡張期に一致する。すなわち、外耳道内圧変動は、頸静脈変動もしくは右心血行動態を反映している可能性が示された。

右心機能を測定するには観血的にカテーテルを挿入して測定する心臓カテーテル法が一般的である。心臓機

図7 心電図（上段）と外耳道内圧変化（下段）の典型例

Fig. 7 The typical example of ECG (above), Pressure in the ear canal (below)

図8 咀嚼時の外耳道内圧変化の典型例

Fig. 8 The typical example of changes in the ear canal pressure during mastication

能を非観血，非侵襲測定する装置としては，超音波法があるが，圧変動が捉えられず血流の変化または弁の動きなど形態情報に限られる．ベッドサイドでは，内頸静脈の脈動や怒張を目視で観察するしかなく，非観血的，無侵襲に頸静脈圧変動を計測し，右心機能を常時連続モニターできることの意義は大きい．そこで，低周波圧センサーを用いた外耳道内圧変動測定が，非侵襲右心機能測定装置の開発に繋がる可能性を検討した．その結果，我々が開発した装置による外耳道内圧測定から得られる体振動情報は，様々な成因により生じる体振動の複合と考えられたが，中心的なものが頸静脈圧変動であることが明らかとなった．頸静脈圧変動は右房の拍動に関連しており，右心機能の有用な診断情報となる．高齢者の見守りには重要な生理指標であり，さらには非侵襲右心機能診断装置への展開が期待できる．

3. 咀嚼運動の検出

さらに，実生活の中で居住者の状態を知る指標には心拍数・音声・感情以外にも様々なものがあると考えられる．そこで本稿では咀嚼に注目し，測定可能な生体情報であるかを検討した．実験には，有線接続の外耳道内圧測定装置を用い，被験者は外耳道内圧測定装置をつけた状態で咀嚼を行った．図8は咀嚼を行った被験者の典型例である．

波形を観察すると咀嚼運動には外耳道内圧に伝わる呼吸拍動や心拍拍動とは異なる，比較的早い速度でプラス側に振れる波形とスパイク性の波形が観察された．図中に黒矢印で示した．咀嚼する食品の種類や状態によってもこれらの変動は大きく変わることから，今後詳細な検討が必要ではあるが，この特徴的な動きを抽出することにより，食事の頻度やタイミング，また咀嚼回数を健康

の指標としてヘルスケアシステムに利用できると考えられた。

Ⅳ. まとめ

以上、これまで取り組んできた共生ロボットによる総合的なヘルスケアシステムの開発について概説した。システムとしては、図9に示したようにロボットに搭載した各種サブプログラムがそれぞれ機能を果たすことで、利用者にヘルスケアシステムとして総合的なサービスを提供している。それぞれのサブプログラムは住居側に用意されたシステムとも連携して機能するが、居住者はシステムの存在を意識することなく、様々な機能を使用することができる。ロボットが人と共生し、違和感なく機能させる工夫はまだまだ必要であるが、共生ロボットが居住空間のインターフェイスと働き、見守りや健康管理機能も十分担えることが確認できた。情報弱者である高齢者や見守りが必要なお年寄りにとって、やさしい生活環境が提供でき、より総合的なヘルスケアシステムとして発展させる様、さらなる取り組みをして行きたいと考えている。

Ⅴ. 文 献

- 1) T. Ogino, M. Tomono, T. Akimoto, and A. Matsumoto, Human Following by an Omnidirectional Mobile Robot Using Maps Built from Laser Range-Finder Measurement, J. Robotics and Mechatronics, 2010; 22: 28-35.
- 2) 平賀 裕, 斎藤善行, 森島繁生, 原島 博: “音声に含まれる感情情報抽出の一検討” 信学技法 1994; 1-8
- 3) 平館郁雄, 赤木正人: “怒りの感情音声における音響特徴量の分析” 信学技法 2002; 43-50

図9 システムの全体像
Fig. 9 System overview

- 4) 関 弘和, 堀 洋一. “高齢者モニタリングのためのカメラ画像を用いた異常動作検出” 電気学会産業応用部門論文誌, 2002; 122-D (2): 182-188
- 5) 宮城慶介, 桜井亮太, 秋元俊成, 寺田信幸, “高齢者見守りシステムとしての転倒検出” 日本遠隔医療学会雑誌, 2010; 6 (2): 215-218.
- 6) 松島美穂他: “心電図モニター電極による皮膚かぶれの要因分析～電極交換日数の見直し～” 徳島赤十字病院医学雑誌, 2008; 13: 22-26
- 7) 秋元俊成, 寺田信幸: “空気動圧センサによる高齢者見守りシステムの開発” 日本遠隔医療学会雑誌, 2007; 3 (2): 237-238