

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

骨転移患者の寝返り支援に向けた  
高精度で高応答な筋電動作認識に関する研究  
Study on a myoelectric signal based  
accurate and quick rollover recognition  
in robotic orthosis  
for cancer bone metastasis patients

申請者

安藤 健
Takeshi Ando

生命理工学専攻 メディカルロボティクス研究
-----------------------

2010年11月

2007年に超高齢社会に突入した日本においては、高齢者・障害者・有病者が自立した生活を送るために、社会的な施策に加えて、物理的に人を支援する技術・機器が必要とされている。脳や筋の電気活動である生体信号を入力信号とする機器は、操作者による直感的な操作が可能であることから注目され、70年代よりオン・オフなど簡単なものは実用化がされてきた。近年では、コンピュータ処理能力や電極材料の急速な発達により、より人間の意図を正確に、簡易に反映する支援システムの実用化が現実のものとなっている。

高齢者・障害者・有病者などすべての人が死を避けることができない。現在、最も多い死因はがんであり、肺がんや乳がんなどにおいては終末期において高い確率で脊椎を主として骨転移が発生する。脊椎に骨転移が発生した場合には、寝返り動作など脊椎の回旋動作を含む運動を行うと、非常に激しい疼痛が生じる。余命の限られた患者は積極的な治療を行わず、体幹装具により疼痛を低減するが、現在の体幹装具は常時体幹の全自由度を拘束し、圧迫するため、装着により患者のQoL (Quality of Life) は著しく低下する。そのため、終末期における最期の自立動作である寝返り動作時など必要とときのみ回旋の自由度の拘束し、動作を支援する機器が必要とされている。

身体機能が低下したがん患者が使用者となる動作支援機器において高い操作性を実現するためには、「運動を捉え、その意図を読み取る」技術が必要となる。この技術は、生体信号を用いた機器の場合には、生体信号からの動作認識問題となる。これまで筋電義手を中心に動作認識に関する研究は数多く行われており、学習機械などの信号処理手法を用いることで高い動作認識率が得られることが報告されている。しかし、支援機器において動作認識に求められる要件は、精度と応答性であるにもかかわらず、応答性について定量的に評価している研究は非常に少ない。また、高齢者・障害者・有病者が日常生活において行う動作は、筋電義手が対象とする手指や前腕の素早い動作だけではなく、緩慢な動作であることが多いため、緩慢動作の動作認識に適した信号処理手法の開発が望まれる。

本研究では、緩慢動作であり回旋動作を含む寝返り動作を対象として、寝返り動作における体幹回旋角度の低減を支援するために、高精度かつ高応答に寝返り動作を認識することを技術課題とする。具体的には、動作前に発生する表面筋電信号から寝返り動作を誤認識なく、動作開始前に認識するアルゴリズムを構築すること、緩慢な寝返り動作であっても動作開始から終了まで安定して認識するためのアルゴリズムを構築すること、という2つの技術課題を設定した。まず、寝返り支援システムが寝返り動作を識別するための入力信号を決定するために、複数の寝返り動作パターンにおける体幹筋群の表面筋電位の解析を行った。その後、決定された入力信号から寝返り動作を高精度かつ高応答に認識するための信号処理アルゴリズムを新たに構築し、信号処理における正確性と応答性の評価を行った。最後に、構築した信号処理アルゴリズムを寝返り支援システムに実装し、寝

返り動作を認識し，疼痛の原因となる回旋動作を抑制できているかを評価することにより，提案する信号処理アルゴリズムの有効性を確認した．

本論文は1章から8章で構成される．

第1章では，高齢者・障害者・有病者の支援機器の研究開発動向について，特に生体信号を使用したサイボーグ機器について，操作の直観性と習得容易性の観点から，その有効性・必要性をまとめた．さらに，ニューラルネットワークを用いた生体信号からの動作認識問題の研究動向をまとめることで，支援機器における動作認識に必要な要件を精度と応答性とし，技術課題を応答性の実現，および緩慢な対象動作での精度と応答性の両立とした．

第2章では，本研究の技術課題の適応例であるがん骨転移に関して，医学的観点から疾患数，疼痛の原因，疼痛への治療法をまとめ，現在の装具療法における問題点を体幹全自由度の常時拘束であるとした．また，対象動作である寝返り動作に対して，終末医療における寝返り動作の意義，能力評価を中心として行われている現状の寝返り動作の研究動向についてまとめた．それらを踏まえ，本研究で開発する寝返り支援システムのコンセプトを，寝返り動作を行うときのみ体幹の回旋自由度を拘束し，患者自身に残された筋力を使いながら，寝返り動作を遂行させるという受動的な支援システムとした．また，身体機能が低下したがん骨転移患者であっても直感的かつ容易に操作できる表面筋電信号を入力とすることとした．そして，提案した受動的支援というコンセプトに関連する研究開発動向をまとめ，機器としての空気圧ゴム人工筋を用いた剛性可変インタフェースというオリジナリティを示した．さらに，第1章で示した課題をがん骨転移患者の寝返り支援という問題に適応したときの具体的な技術課題をまとめた．

第3章では，信号処理に関する要求仕様を算出した．応答性に関しては，空気圧ゴム人工筋の収縮時間，電磁弁の開閉時間をもとに，寝返り動作前に可動域拘束機能を有効に機能させるには，動作開始前約60[msec]までに動作認識を行う必要があるとした．一方，精度に関しては，看護師へのヒヤリングから95%以上の識別に関する精度が必要であるとした．

第4章では，寝返り支援システムに関しても開発要件をまとめ，それをもとに開発されたプロトタイプの様相についてまとめた．寝返り支援システムに関しては，まず体幹回旋運動のモデル化および運動学的解析を行った．これにより回旋角度と右（左）肩峰と左（右）上前腸骨棘の体表距離の間に成り立つ関係を導いたので，回旋時に変化する肩峰と上前腸骨棘の距離を制限するように空気圧ゴム人工筋を体幹胸側に交差するように配置し，空気圧ゴム人工筋の収縮による長さや剛性の変化により体幹回旋の自由度を拘束する機構とした．また，開発した機構に対して，関節可動域の変化および身体負荷の観点から有効性を評価した．

第5章では，寝返り支援システムにおいて寝返り動作を識別するための入力信号を決定する実験を行った．まず筋電信号が明瞭な若年者の寝返り動作における

表面筋電位を体幹筋群（内腹斜筋，外腹斜筋，腹直筋，脊柱起立筋）の20箇所から計測した。定性的解析により内腹斜筋と外腹斜筋が寝返り動作時に活発に活動していることがわかり，さらにARV（区間平均値）を用いた定量的解析により寝返り動作初期に内腹斜筋の下部が最も強く反応していたので，入力信号を左右の内腹斜筋下部の表面筋電信号とした。また，高齢者においても同様の傾向が確認された。さらに，実際の現場での利用を想定して，電極位置および姿勢が筋電信号に与える影響を解析したところ，姿勢の影響は少なく，位置は腸骨稜に沿って貼付することで，電位の再現性の高い筋電信号を得られることがわかった。

第6章では，内腹斜筋の筋電信号から寝返り動作を認識するための信号処理手法を構築した。本研究では，非線形かつ時変的な筋電信号に対応するためにニューラルネットワーク（TDNN）を基本的アルゴリズムとして用いた。まず，精度と応答性を両立するためのマイクロ・マクロ・ニューラルネットワーク（MMNN）を提案した。MMNNは混合エキスパートモデル（MoE: Mixture of Expert）の一種であり，緩慢な動作における長時間の筋電信号に対して，生信号が入力されるマイクロパートで応答性を実現し，圧縮した信号が入力されるマクロパートで安定性を確保するものである。MMNNを用いて健常者の寝返り動作にする動作認識を行ったところ，動作開始前65[msec]に寝返り動作を認識できていることがわかった。また，従来手法であるTDNNと比較すると，誤認識回数を3分の1に低減できた。これにより提案したマイクロ・マクロ・ニューラルネットワークを用いることで，精度と応答性を両立する動作認識を実現できることを示した。

第7章では，構築したMMNNのアルゴリズムを実装した寝返り支援システムを用いて，寝返り動作時の動作認識性能に加え，寝返り動作中に体幹回旋角度抑制性能を評価した。まず，看護師へのヒヤリングから，硬性装具装着時の膝立て型の寝返り動作を行ったときの回旋角度を許容回旋角度（24.5[deg]）と設定した。体幹の運動の異なる3種類の寝返り動作パターンに対して寝返り動作時の回旋角度を計測したところ，上肢先行型では14.5[deg]，下肢先行型では15.1[deg]，膝立て型では26.2[deg]となり，許容値に対して上肢先行型・下肢先行型では有意に小さく，膝立て型では有意差がなかった。以上より，開発した寝返り支援システムは，寝返り動作中の体幹回旋動作を効果的に抑制できていることがわかった。

第8章では，本研究で得られた成果をまとめて，残された課題に関して述べた。また，構築した緩慢動作の高精度かつ高応答な動作認識の応用，および体幹回旋拘束システムの他疾患への応用事例，剛性可変インタフェースの応用事例，また，応用するための課題や解決指針に関して示した。

以上より，がん骨転移患者の寝返り支援を事例として，高齢者・障害者・有病者の緩慢な動作を高精度かつ高応答に認識するためのマイクロ・マクロ・ニューラルネットワークを提案し，その設計方法を明らかにするとともに，動作認識における有効性を示した。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 安藤 健 印

(2010年10月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文○	[1] Takeshi Ando, Jun Okamoto, Mitsuru Takahashi, Masakatsu G. Fujie, Response Evaluation of Rollover Recognition in Myoelectric Controlled Orthosis Using Pneumatic Rubber Muscle of Cancer Bone Metastasis Patient, Journal of Robotics and Mechatronics, (submitted)
論文○	[2] Takeshi Ando, Jun Okamoto, Masakatsu G. Fujie, Micro Macro Neural Network to Recognize Rollover Movement, Advanced Robotics, 2010 (Accepted), vol.25, no.2,3 (published in February 2010)
論文○	[3] Takeshi Ando, Jun Okamoto, Mitsuru Takahashi, Masakatsu G. Fujie, Intelligent Trunk Corset to Support Rollover of Cancer Bone Metastasis Patients, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 15, No. 2, pp. 181-190, 2010
論文	[4] 安藤健, 藤江正克, 表層筋と深部筋の表面筋電位の SVM による識別 (肩外転動作と外旋動作の識別), 日本機械学会論文集 C 編, 076 巻 762 号, pp. 297-303, 2010
論文	[5] Takeshi Ando, Jun Okamoto, Mitsuru Takahashi, and Masakatsu G. Fujie, EMG based Design and Evaluation of Micro Macro Neural Network for Rollover Support Trunk Orthosis, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010, 2916-2921
論文	[6] Ando Takeshi, Okamoto Jun, Fujie Masakatsu G., Optimal Design of a Micro Macro Neural Network to Recognize Rollover Movement, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, 1615-1620
論文○	[7] 安藤健, 岡本淳, 藤江正克, EMG を用いたガン骨転移患者のための寝返り支援機器の開発 (第一報) 入力信号としての寝返り時の EMG 信号解析, 生体医工学, 46(3), pp. 383-389, 2008
論文	[8] Takeshi Ando, Jun Okamoto, Masakatsu G. Fujie, "Development of a Micro-Macro Neural Network to Recognize Rollover Movement", 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2008, pp. 5228-5233.
論文	[9] Takeshi Ando, Jun Okamoto, Masakatsu G. Fujie, "Intelligent corset to support rollover of cancer bone metastasis patients", The 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008, pp.723-728
論文	[10] Ando Takeshi, Okamoto Jun, Masakatsu G. Fujie, "The development of roll-over support system with EMG control for bone metastasis patients", Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, pp. 1244-1249
論文	[11] Ando Takeshi, Nihei Misato, Masakatsu G. Fujie, "Estimation of Rotator Cuff Using Surface EMG During shoulder External Rotation", Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006, pp.1634-1639
講演	[12] 安藤健, 岡本淳, 高橋満, 藤江正克, 骨転移がん患者用体幹装具における EMD を考慮した寝返り認識システムの評価, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH) 2010, 1A2-F11, 2010
講演	[13] 安藤健, 小林洋, 岡本淳, 高橋満, 藤江正克, 筋電制御によるゴム人工筋を用いたがん骨転移患者の寝返り支援コルセットの開発, 福祉工学シンポジウム 2009, 175-176,

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	2009 [14] 安藤 健, 小林 洋, 岡本 淳, 高橋 満, 藤江 正克, がん骨転移患者の寝返りを支援するインテリジェントコルセットの開発—空気圧ゴム人工筋による体幹回旋可動域の制限機構—, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2A1-L04, 2009
講演	[15] 安藤 健, 岡本 淳, 藤江 正克, 寝返り動作認識のための Micro Macro Neural Network の開発, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2A2-D07, 2009
講演	[16] 安藤健, 岡本淳, 高橋満, 藤江正克, “ガン骨転移患者の寝返りを支援する知的体幹装具の開発”, 第6回生活支援系学会連合大会, 2008, p. 80
講演	[17] 安藤健, 岡本淳, 藤江正克, “EMG を用いたガン骨転移患者の寝返り支援機器の開発”, 第五回生活支援系学会連合大会, 2007, p. 123
著書	[18] Takeshi Ando, Jun Okamoto and Masakatsu G. Fujie (2009). Micro Macro Neural Network to Recognize Slow Movement: EMG based Accurate and Quick Rollover Recognition, Recent Advances in Biomedical Engineering, Ganesh R Naik (Ed.), ISBN: 978-953-307-004-9, INTECH
その他 (論文)	[19] Yinlai Jiang, Shuoyu Wang, Kenji Ishida, Takeshi Ando, Masakatsu G. Fujie, Directional Intention Identification for Motion Control of an Omni-directional Walker, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, (submitted)
その他 (論文)	[20] 中島康貴, 大木英一, 安藤健, 小林洋, 藤江正克, 歩行支援機 Tread-Walk 2 の操作性向上のための制御アルゴリズムの構築—摩擦を考慮したトレッドミルの力学的モデルを用いたモータ電流値からの蹴り力推定—, 日本ロボット学会誌, 28(7), 776-782, 2010
その他 (論文)	[21] Yo Kobayashi, Takeshi Ando, Masatoshi Seki, Takao Watanabe, Masakatsu G. Fujie, Fractional Impedance Control for Reproducing the Material Properties of Muscle, 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Accept)
その他 (論文)	[23] Yo Kobayashi, Takao Watanabe, Takeshi Ando, Masatoshi Seki, Masakatsu G. Fujie, Fractional Impedance Control for Reproducing the Material Properties of Muscle and its Application in a Body Weight Support System, The third IEEE RAS / EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, (Accept)
その他 (論文)	[25] Yinlai Jiang, Shuoyu Wang, Kenji Ishida, Takeshi Ando and Masakatsu G. Fujie, Directional Intention Identification Based on the Force Interaction between an Omni-directional Walker and a Human, International Conference of Biomedical Fuzzy Systems Association 2010 (発表予定).
その他 (論文)	[26] Yinlai Jiang, Shuoyu Wang, Kenji Ishida, Takeshi Ando and Masakatsu G. Fujie, The Possibility of Quickening Walking Rehabilitation by Imaginary Walking, International Conference of Biomedical Fuzzy Systems Association 2010 (発表予定)
その他 (論文)	[27] Yasutaka Nakashima, Eiichi Ohki, Takeshi Ando, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, Drive Motor Current Based Real-time Estimation of Anteroposterior Force, 32st Annual International Conference of the IEEE EMBC2010, pp. 475-478, 2010
その他 (論文)	[29] Ohki Eiichi, Nakashima Yasutaka, Ando Takeshi, Fujie Masakatsu G., An Algorithm of Walk Phase Estimation with Only Treadmill Motor Current, 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, 4060-4066

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 （論文）	[30] Eiichi Ohki, Yasutaka Nakashima, Takeshi Ando, Masakatsu G. Fujie, Treadmill Motor Current Value Based Walk Phase Estimation, 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2009, 7131-7134 など他10本（主著：8，共著：2）
その他 （解説）	[31] 藤江正克, 安藤健, 二瓶美里, トレッドミルとロボット技術を融合した歩行リハビリテーション, 計測と制御, (査読中) [32] 藤江正克, 安藤健, トレッドミルを応用したロボット, Journal of Clinical Rehabilitation, リハを支えるテクノロジー最前線, Vol.19, No. 7, 618-621, 2010 [33] 高岩昌弘, 則次俊郎, 安藤健, 2009年度年次大会開催報告 市民フォーラム「生き生き自立生活！-機械工学が導く福祉社会の未来-」, パネルディスカッション「福祉社会を支える介護支援システムへの期待」, 日本機械学会誌, 112 (1093), 90-91, 2009.12 [34] 藤江正克, 安藤健, 21世紀ロボットチャレンジプログラム, 総合リハビリテーション, 37(9), 799-802, 2009 [35] Takeshi Ando, Masakatsu G. Fujie, "Waseda University was a pioneer in the collaboration between the engineering and medical fields in Japan," JSME NEWS19(2), Japan society of Mechanical Engineers, 2008
その他 （招待講演）	[36] 第33回総合リハビリテーション研究大会 分科会2, 「若手から・これからの支援機器」, 2010.9.3 [37] 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Workshop on Rehabilitation and Assistive Robots for an Aging Society, "Treadmill based rehabilitation and assistive robot", 2010.5.8 [38] TAMA-TLO 第4回技術講演会, 「ふるえ（本態性振戦）を抑制する肘装着型ロボット」, 2010.3.26 [39] 三重県立四日市高等学校 第11回 ようこそ先輩, 「高校の勉強から大学の研究-誰も見たことのない絵を描こう-」
その他 （講演）	[40] 姜銀来, 王碩玉, 石田健司, 安藤健, 藤江正克, 全方向移動型歩行支援機による歩行支援のための方向意図の同定法, ロボット学会学術講演会, (採録決定) など他21本（主著：5，共著：16）
その他 （著書）	[41] Misato Nihei, Takeshi Ando, Yuzo Kaneshige, Takenobu Inoue and Masakatsu G. Fujie (2010). Development of a New Vehicle Based on Human Walking Movement with a Turning System, Robotics 2010 Current and Future Challenges, Houssef Abdellatif (Ed.), ISBN: 978-953-7619-78-7, INTECH
その他 （特許）	[42] 特願 2010-061823 不随意運動抑制システム、運動認識装置及び運動認識用プログラム [43] 特願 2010-96643 力覚提示装置 [44] 特願 2009-071052 測距装置及びそのプログラム、並びに測距システム [45] 特願 2009-200101 歩行リハビリ装置