

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 15 日現在

機関番号：54301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2012

課題番号：22500523

研究課題名（和文）

脚部電気刺激と体重荷重軽減を併用する歩行能力改善用立ち上がり・着座訓練装置

研究課題名（英文）Sit-to-stand rehabilitation device with electrical stimulation and reduction of body weight to improve walking performance

研究代表者

鈴木立人（TATSUTO SUZUKI）

舞鶴工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：90270298

研究成果の概要（和文）：

本研究では、脚部電気刺激と体重荷重軽減を併用する歩行能力改善用立ち上がり・着座訓練装置を開発するために基礎的な下記の3点について研究成果を得た。(1) 立ち上がり動作のモデル化を行い、立ち上がり可能動作域の検討と健常者を対象とした幅広い年齢層における立ち上がり挙動の抽出。(2) 体重荷重軽減を行うための補助力制御システムとして assist-as-needed 制御手法を単純押付け動作にて検討、および立ち上がり動作評価を行うウェアラブル IMU システムの開発。(3) 立ち上がり補助を実施する脚部電気刺激として大腿直筋、臀筋による刺激手法と電気刺激波形に対する主観的痛みについて検討を行った。

研究成果の概要（英文）：上記の英訳

This study is aimed at developing a sit-to-stand rehabilitation device with electrical stimulation and reduction of body weight to improve walking performance. This study discussed following three important points. (1) Develop a link model for sit-to-stand motion and find the possible sit-to-stand area. And find the standard sit-to-stand motion from the experiments with the participants in various ages. (2) Develop an assist-as-needed control strategy and validate it in the case of propelling an attendant-propelled wheelchair, and develop the posture evaluation system by wearable IMU sensors. (3) Develop the electrical stimulation methodology in rectus femoris and gluteal muscles, and evaluation the subjective pain by electrical stimulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：福祉・介護用ロボット

1. 研究開始当初の背景

現在、医療技術が発展し、高齢化が進んでいる中、循環器系疾患の脳血管疾患は平成 20 年厚生労働省人口動態統計で死因第 3 位(死亡

者数全数の 11.1%)である。平成 14 年厚労省患者調査で継続的な治療中の患者数は、137 万人である。脳血管疾患は手足の麻痺等による後遺症のため、寝たきりの原因一位と多く

の割合を占め、社会福祉費の増加に拍車を掛ける一因となっている。この傾向は日本国のみならず欧米でも同様であり、予防策を講じるとともに病後の各患者が継続して長く取り組める対費用効果が高いロボティクス援用のリハビリテーション手法の開発が強く望まれている。

現在の脳血管疾患におけるリハビリテーションにおいては、病直後の急性期から関節拘縮の予防や各関節可動域(ROM)の確保、各筋の増強訓練等が第一に実施開始されるが、次ステップとして立ち上がり・着座を伴う移乗訓練(車いす~ベッド, トイレ間)が日常生活動作(ADL)改善に大きく寄与する。立ち上がり・着座訓練は、患者の自立生活を確立する可能性を高め、入院期間が短縮できるため、医療費や介助者負担の軽減等、医療福祉的に効果は非常に高く、多くの急性期・回復期リハビリテーション病院で実施されている。また、人は歩行中に逐次変化する動的なバランスを巧妙に調節しており、歩行リハビリテーション訓練は転倒等の危険があり防止策として人員配置が必要になるが、基礎的な立ち上がり・着座訓練は歩行訓練より安全に実施できる特徴がある。加えて、立ち上がり・着座訓練は80歳代虚弱高齢者においても2ヵ月間継続訓練により6分間歩行能力を大きく改善することが証明されており[文献1], 歩行能力改善を目的として、立ち上がり・着座訓練はリハビリテーション効果が高い。しかしながら、患者の麻痺状況や病後の回復状況によって、その時点での患者の立ち上がり・着座能力が極めて乏しい場合は、転倒等の危険を防ぎつつ同訓練を実施することは難しい。現在のリハビリテーションでは病後出来るだけ早期のリハビリテーション開始が長期の回復進歩を高めるという事実が多く確認されており、患者がまったく立ち上がれない状況下でさえ、工夫しながら立ち上がり訓練を開始したいというリハ

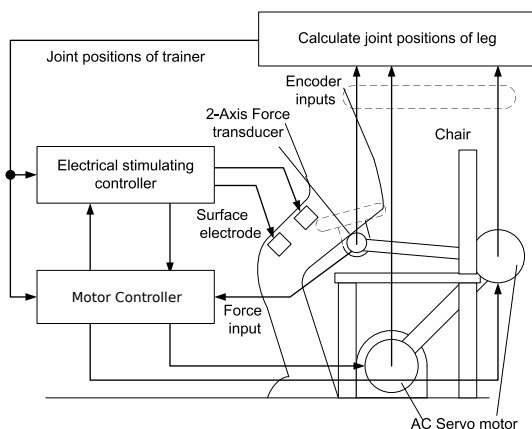


Figure 1 提案する立ち上がり訓練装置の概要

ビリテーション現場の声は強い。

参考文献

[1]西本ほか,「椅子からの立ち上がり動作」を用いた訓練効果の検討 後期高齢女性の下肢筋機能,重心動揺および歩行能力への影響,理学療法科学,Vol.14, No.4(1999),pp.181-187

2. 研究の目的

上記研究背景の解決手法として、本研究では脚部電気刺激と体重荷重軽減を併用する歩行能力改善用立ち上がり・着座訓練装置を提案・開発する。概要図に示す本装置は立ち上がり・着座時において2リンクアームにより腰部を下部から支え、立ち上がり・着座動作に応じて下肢に掛かる体重荷重の軽減を行う機構を有している。同時に立ち上がり・着座時の脚状態を腰部位置より推定し、立ち上がり・着座動作時に使用する主要な脚部筋に電気刺激を行う。

現在のロボティクス援用のリハビリにおいて下記の3点の研究動向があり、これらの動向を本装置開発に組み入れる。

(1)運動療法と機能的電気刺激(FES)を併用したリハビリテーションは、重度の片麻痺患者において訓練開始から1ヵ月後において日常生活動作の大きな向上が得られ、2ヵ月後においては軽度の片麻痺患者においても効果が如実に表れる[文献2]。機械的な補助と機能的電気刺激(FES)を併用したハイブリッド型リハビリテーション手法は訓練効果を極めて促進することが明確になりつつあり、主に欧米において、現在ハイブリッド式ロボティクス援用リハビリテーション機器が提案・試作、検証され始めている。

(2)平均60歳における脳卒中後、麻痺下肢の1ヵ月間の実動作訓練(体重荷重軽減を併用したトレッドミル歩行訓練)により、大脳皮質部の脳機能改善が大きく行われていることがfMRIを用いた評価により証明され[文献3],立ち上がり等の実動作を伴うリハビリテーションは脳出血等で破壊された脳組織部に代わる脳機能の再生にとっても効果が高い。

(3)動作訓練において、体重の荷重軽減を行うことはリハビリテーションの効果を高めるといふ論文が多いという調査[文献4]があり、患者の残存下肢機能や筋力状態に応じて機械的な体重軽減補助は必要である。

本研究の独創性とその価値について、本装置は訓練時の安全性を比較的簡単に確保しつつ、患者の日常生活動作、歩行能力改善が効果的に得られ、加えて医療現場で即使用可能になるなど現存する他訓練装置と比較して優位性が非常に高いと予想されるが、同形態の立ち上がり・着座訓練用装置の試作・検証報告は国内外で未だ存在しない。また、

退院後に在宅で患者自身が継続して安全に使用することも可能であり、立ち上がり・着座リハビリテーション機器として非常に優れる。本装置を用いて継続した立ち上がり・着座訓練を行えば下肢能力強化が達成でき、日常動作能力、歩行能力は大きく改善し転倒予防にも繋がると予想される。また、脳血管疾患等麻痺患者の退院時期は早まり、寝たきりの患者数を低減させ介助者負担を軽減でき、社会問題である福祉予算増加に歯止めを掛ける可能性を大きく秘める。

参考文献

- [2]Tanovic, E., Effects of functional electrical stimulation in rehabilitation with hemiparesis patients, *Bosn J Basic Med Sci*, Vol.9, No.1(2009), pp.49-53
- [3]Enzinger, C., et al, Brain activity changes associated with treadmill training after stroke, *Stroke*, Vol.40, No.7(2009), pp.2460-2467
- [4]Damiano, D. L., DeJong, S. L., A systematic review of the effectiveness of treadmill training and body weight support in pediatric rehabilitation, *J Neurol Phys Ther*, Vol.33, No.1(2009), pp.27-44

3. 研究の方法

本研究で提案する脚部電気刺激と体重荷重軽減機構を併用したハイブリッド式ロボティクス援用による立ち上がり・着座訓練装置を開発するには、下記3項目に重点を置

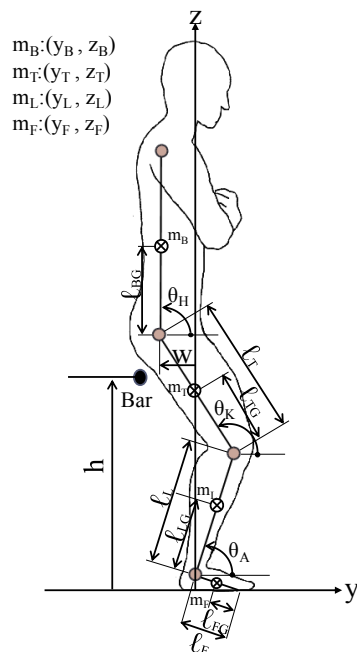


Figure 2 立ち上がり動作モデル

き、研究を進める必要がある。

(1)立ち上がり補助を行う立ち上がり規範モデルの構築

健康者による立ち上がり・着座挙動について重心移動に着目し、自然な立ち上がり挙動について検討を進める。また、立ち上がり動作の力学モデルを用い、立ち上がり可能となる範囲について検討を進めた。これらの成果により、無意識に実施している立ち上がり・着座動作の自然挙動を抽出でき、モデル化された立ち上がり・着座動作を用いることにより、自然な補助制御を行う際の指標として利用できる。また、立ち上がり限界範囲を検討することで、安全に立ち上がり補助を行うことが可能となる。

介助いす座面の移動経路を、起立動作が可能な着座姿勢に着目して検討する。図1に示すように、棒状の座部に着座し、立ち上がり後の姿勢を、上部部、大腿部、下腿部、足部の分節から成る4節でモデル化する。ただし、頭、胴、上肢の上部部は単節と見做す。また、座標軸系 x, y の原点は、足底全面が接地した状態下での外踝の直下で定義する。そして、大転子高さは、座棒の高さ h に被験者の臀部肉厚 110[mm]を加算した位置に対応する。分節毎の質量比と質量中心の位置は他論文から引用する。

(2)体重軽減用補助動力の制御手法検討

本研究では必要時に立ち上がり補助を実施する、assist-as-needed 制御手法を検討する。この制御手法は立ち上がり挙動を逐次評価を行いながら、ある範囲においては補助を行わず自由に立ち上がり動作を実施してもらう。しかし、立ち上がり難度が高くなる、例えば標準となる立ち上がり挙動から大きく外れ、立ち上がり限界に近づく等が発生した場合、立ち上がり補助をロボティクス援用により実施する。立ち上がり挙動評価は IMU を用いたウェアラブルセンサの検討を行い、assist-as-needed 制御手法について単純な動作補助を行う場合について検討を行った。

(3)脚部筋の機能的電気刺激手法検討

脚部筋の機能的電気刺激は、患者が実施している立ち上がり動作と協調して主要な脚部筋を刺激収縮させ、立ち上がり動作を推進させるよう実施する。第一段階として膝関節の伸展を行う大腿四頭筋の表面電極による刺激について検討を進める。また同時に大腿直筋と臀筋の刺激手法も検討する。あと、電気刺激を実施する際に問題となる主観的痛みについて電気刺激波形との関係について検討を行った。

4. 研究成果

(1)立ち上がり補助を行う立ち上がり規範モデルの構築

下肢部の3分節の寸法と座棒高さ h 、外踝位置 w から、幾何学的に算出される足および膝関節角度 θ_A, θ_K の関係を、図3の w, h 平面上に描き示す。また、図中の代表点については、その際の姿勢をリンク化して記す。この指示域内には、関節可動域や体重重心位置により、実現が不可能な姿勢が含まれる。座棒から臀部を僅かに浮かせ、静的に立位状態に移行させ維持した直後の y 軸方向の体重重心位置 y_G を算出し、 y_G が踝と爪先部間の $-50 < y_G < 200$ [mm] とする足部の支持基底面内にある場合を、安定な起立可能姿勢と定義する。腰関節角度を $\theta_H = 90$ [deg]、被験者の足関節が無理な背屈状態とならない限界角度を概ね $\theta_A = 45$ [deg] と推定した代表特性を図4に示す。なお、起立可能姿勢は、灰色で塗布した $w \sim h$ の領域で得られる。本領域は図3の塗布部位の拡大図である。関節モーメントによる被験者の起立可能な制限領域は、実験的に口点に沿う $|M_K| > 150$ [Nm] の領域で、 M_A は塗布領域内では制約を持たない。 $|M_K|$ は高齢化すると成人の30~40 [%]程度の低減化を生じるため、通常の着座状

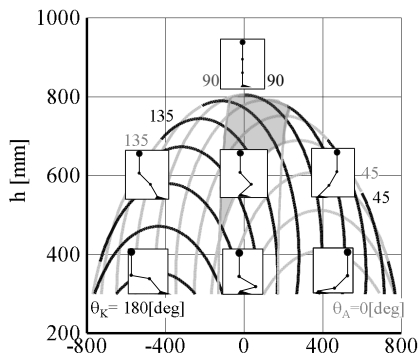


Figure 4 制限がない立上がり姿勢

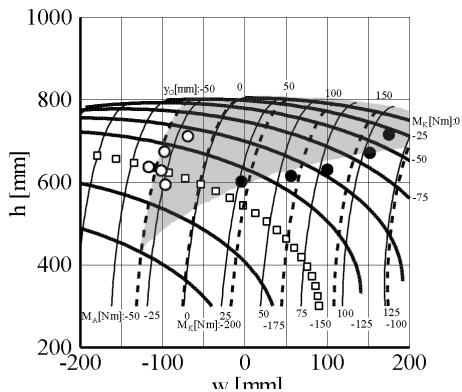


Figure 3 実制限を加えた立上がり可能範囲

態からの起立は困難となる。

また、年齢18才から81才までの被験者56名による立上がり・着座動作について3段階の高さから実施を行った。体幹 90° 、膝角度 90° 、地面に対する下肢角度 90° を基準位置として、足高さを+100mmした場合と座面高さを+100mmとした場合について検討した。立上がりは腕を前に組んで実施した。結果からいずれの年齢の被験者も3段階の高さから立上がり・着座動作を遂行できた。また立上がり高さが低くなるにつれて立上りの主観的困難さが上昇した。また立上がり高さが低くなるにつれて、前方への上体の傾きが増す傾向にあった。重心位置に着目した動作挙動評価により標準的な立上がり挙動について推定が可能となった。

(2) 体重軽減用補助動力の制御手法検討

assist-as-needed 制御手法について、介助用車いす等の押付け単純動作を取上げ、検討を行った。押付け動作は1次元の運動であり、モデル化を実施しやすく補助制御システムの検討には便利である。図5に示す図は車いす駆動時の押付け動作特性を示している。押付け速度が増加すると発揮力が低下する特性となっている。ここで図中の破線のように補助を実施する境界を定義し、補助境界以下の押付け動作を実施した場合は補助を行わず、介助者の押付け動作が補助境界を超えた場合に補助を実施するシステムとして検討を行った。シミュレーション結果の図6より、提案した assist-as-needed 制御手法はうまく動作しており、被験者は補助境界内において自

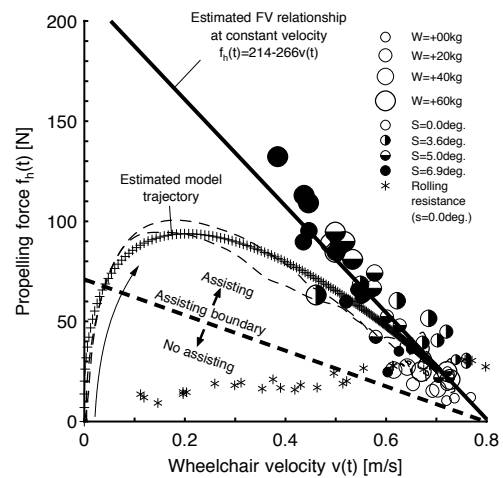


Figure 5 補助制御手法

力で押付け動作を実施していることがわかる。立上がり補助システムでは、補助境界として重心位置の標準位置からの偏差を定義することにより、同様の assist-as-needed 制御手法を構築できることがわかった。

また、IMU による下肢の動作挙動取得について検討を行った。3 軸加速度センサとジャイロセンサをペアにした IMU センサを体幹、大腿、下腿に装着し、カルマンフィルタを用いて傾き角の検出を実施した。この結果より、下肢の姿勢を検出できるようになり、姿勢評価を行う事ができるようになった。加えて、各下肢の関節トルクを逆動力学解析することにより算出することが出来た。スクワットジャンプ動作を例に取上げ、大腿、膝、足関節において算出した関節トルクの例を図7に示す。図中の実線は床反力計から得られた実測値であり、赤線が推定した関節トルクである。両者は非常に良く一致しており、本手法により IMU センサにより姿勢検出、並びに関節トルク推定が精度よく行えることがわかった。この手法を用いることにより、立ち上がり時の姿勢評価を的確に実施でき、提案する assist-as-needed 制御手法を有効に適用することができる。

(3)脚部筋の機能的電気刺激手法検討

立上がり補助を行う下肢筋群の刺激手法について検討した。刺激開始のトリガは体幹の指定角度信号を用いた。被験者は椅子に大腿、膝、下腿角度が 90-90-90 となるような着座姿勢を基準として、立上がり動作を開始した。体幹角度が指定値を超えた時点で、下肢筋群の刺激を開始し、直立した時点で刺激を停止した。また足の高さ+100mm、座面高

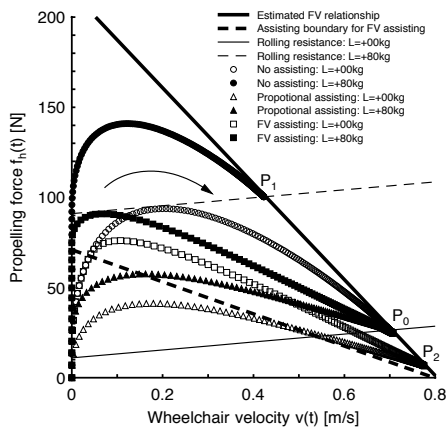


Figure 7 Assist-as-needed 制御

さを+100mm となるような 3 段階の座面高さをを用いて試験を行った。対象とする下肢筋として、大腿 2 頭筋のみ、大腿直筋と臀筋、という 2 手法を検討した。被験者は成人男性 2 名である。大腿 2 頭筋のみの場合は予備実験時に発揮膝関節トルクが小さく、実際の立上がり動作においても体感が乏しい状況であった。大腿直筋と臀筋の組合せ刺激は体幹が反り、膝関節が伸びる動作を誘発するため、立上がり動作において主観的な効果を実感できた。これらの結果により、姿勢評価を行いつつ、適宜下肢筋の刺激を行う事により、立上がり動作について電気刺激による補助動作の誘発が可能である事がわかった。

また、電気刺激手法と主観的な痛みとの関係について足関節を例に検討したところ、図 8 のように動作を行う機械動力に比例して、主観的な痛みも増加していくことがわかった。

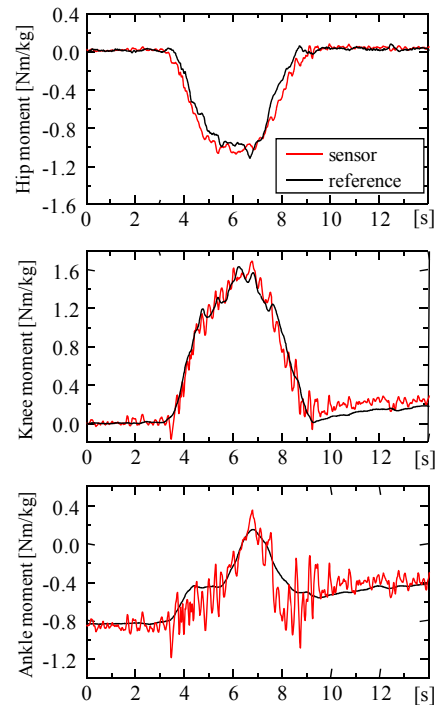


Figure 6 推定下肢関節トルク

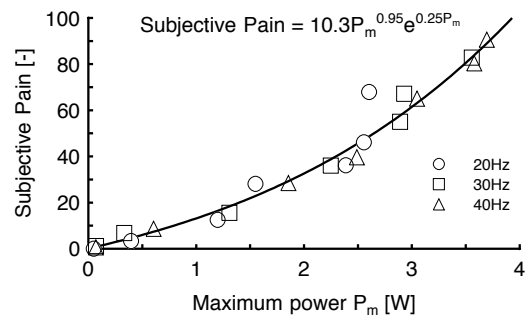


Figure 8 主観的痛み

(4) まとめ

脚部電気刺激と体重荷重軽減を併用する歩行能力改善用立ち上がり・着座訓練装置を開発するために基礎的な研究成果を得た。今後は装置の制作、患者への適合評価等を実施し、リハビリ装置の効果検証を進める予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

(1)鈴木立人, 渡邊高志, 佐浦隆一, 内山寛信, Movement, Torque and Subjective Pain by Electrical Stimulation in Ankle Plantarflexion, 舞鶴高専紀要 No. 46, pp11-14, 2011

[学会発表] (計8件)

(1)Tatsuto Suzuki, Hironobu Uchiyama, Catherine Holloway, Nick Tyler, Assisting Control for Attendant Propelled Wheelchair based on Force Velocity Relationship, 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society(EMBC2012), USA, 2012

(2)Takashi Watanabe, Hiroaki Mori, and Tatsuto Suzuki, A Preliminary Test of Lower Limb Joint Moment Estimation Method without Ground Reaction Force using Inertial Sensors, 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society(EMBC2012), USA, 2012

(3)Naoto Miura, Takashi Watanabe, Kiyokazu Akasaka, Tatsuto Suzuki, A Study of Gait Evaluation Using a Prototype FES Rehabilitation System: A Case Study in Foot Drop Correction with a Hemiplegic Patient. 第51回日本生体医工学会大会, 第50巻, 特別号, OS1-03-3, in CD-ROM (2012).

(4)吉野祥生, 吉澤英之, 石田享子, 鈴木立人, 起立動作時に於ける介助いす座面の移動軌跡推定, 日本機械学会関西支部学生会卒業研究発表講演会前刷り集, 講演番号 1618, 2012

(5)Tatsuto Suzuki, Takashi Watanabe, Ryuichi Saura, Hironobu Uchiyama, Mechanical Power of Ankle Plantar Flexion and Subjective Pain by Monophasic Electrical Stimulation, Proceedings of 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society(EMBC2011), USA, pp7234-7237, 2011

(6)Naoto Miura, Takashi Watanabe, Kiyokazu Akasaka, Tatsuto Suzuki, A Clinical Trial of a Prototype of Wireless Surface FES Rehabilitation System in Foot

Drop Correction.[Proceedings of 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society(EMBC2011), USA, pp5481-5484, 2011

(7)吉澤英之, 内山寛信, 石田享子, 鈴木立人, 起立・着座動作の解析と介助椅子機構による支援形態の評価, 日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会講演論文集, p10-5, 2011

(8)吉澤英之, 石田享子, 内山寛信, 鈴木立人, 起立・着座動作時の上肢・下肢負担の実験的解析, 福祉工学シンポジウム 2010 講演論文集, 3D2-2(CD-ROM), 2010

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 立人 (SUZUKI TATSUTO)

舞鶴工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号: 90270298

(2)研究分担者

渡邊 高志 (WATANABE TAKASHI)

東北大学・医工学研究科・准教授

研究者番号: 90250696

内山 寛信 (UCHIYAMA HIRONOBU)

関西大学・工学部・教授

研究者番号: 40067707

佐浦 隆一 (SAURA RYUICHI)

大阪医科大学・医学部・教授

研究者番号: 10252769

石田 享子 (ISHIDA KYOKO)

奈良女子大学・人間文化研究科・博士研究員

研究者番号: 90449827

(2011のみ)

(3)連携研究者

()

研究者番号: