神奈川工科大学　ﾋｭｰﾏﾝﾒﾃﾞｨｱ研究ｾﾝﾀｰ
研究成果報告書

第　9　号

平成 25 年度

神奈川工科大学

工学教育研究推進機構

ヒューマンメディア研究センター
平成25年度研究成果報告の発刊に際して

研究代表者：情報ネットワーク・コミュニケーション学科　井上哲理

ヒューマンメディア研究センターでは，ヒューマンメディアに関する基礎研究，応用研究を情報分野，工学分野，バイオ・栄養科学分野の研究者が協力しながら実施をしている．我々の研究センターで扱うヒューマンメディアとは，コンピュータ，ネットワーク，メディア表現技術を駆使して，自然なコミュニケーションを可能にして，さらには現実空間では実現の難しい場面でのコミュニケーションを人間にとって自然な形で提供できるメディアを指すものである．基礎研究では，立体映像や拡張現実映像メディアのディスプレイ技術や表示処理技術，あるいは仮想空間に対する人間の特性，新たなインタフェース技術の研究があり，応用研究では映像と音響，映像と触力覚情報を組み合わせた感覚協調メディアのトレーニング・リハビリテーションあるいは学習・教育への応用などの研究が実施されている．

平成23年度からは研究員（教員）13名による研究プロジェクト「次世代ヒューマンメディアを活用した体験・体感型学習支援技術の研究」をスタートさせた．本プロジェクトの目的は，「立体表現メディア技術」，「仮想空間入出力メディア技術」，「感覚協調メディア技術」などの次世代ヒューマンメディア技術を学習・訓練場面に効果的に応用することである．従来のような紙媒体教材の代替えとして映像メディア等を利用する学習方法に対して，対象や環境への直接体験に近い感覚を得られて，かつ学習効果の向上が可能な学習コンテンツの提案を目指している．研究では，コンテンツのプロトタイプ作成および入出力技術の開発，学習・訓練効果の評価を行っている．

平成25年度は研究プロジェクトの第1期の終了年度である．そこで，各メンバーにおいては23年度からの研究のまとめと今後の発展方向について検討を行った．

この3年間の研究では，3次元コンテンツ提示法，3DCG描画法の研究，モーションキャプチャ基盤システムの研究，リハビリテーションへの応用，サウンド提示の感性・認知への効果・影響の研究，栄養管理教育へのメディア応用で研究成果を得ることができた．特に，モーションキャプチャ基盤システムと音響研究の一部は実用開発段階へと発展した．一方，個々の研究では一定の成果は得られたが，研究プロジェクト全体での体験・体感型学習支援技術については十分な成果は得られず，これまでの研究の進め方を検証して，今後さらに研究を進めていくことが必要と言える．

研究プロジェクトメンバー

研究代表者

情報学部　情報ネットワーク・コミュニケーション学科　井上哲理

研究メンバー

氏　名	所属・職位等	役割分担
井上　哲理	情報ネットワーク・コミュニケーション学科・教授	仮想空間での評価
上平　員丈	情報ネットワーク・コミュニケーション学科・教授	全体統括. インタラクションの基礎研究
谷中　一寿	情報メディア学科・教授	3 次元コンテンツ提示法の研究
服部　元史	情報メディア学科・教授	3DCG コンテンツ作成法の研究
高尾　秀伸	ロボットメカトロニクス学科・准教授	仮想環境評価の脳機能面での基礎研究
田中　博	情報工学科・教授	動作認識の研究
小島　一成	情報メディア学科・准教授	生体計測の研究
吉野　和芳	ロボットメカトロニクス学科・准教授	運動コンテンツ作成法の研究
西口　磯春	自動車システム開発工学科・教授	サウンド提示の感性への効果の研究
黒川　真毅	情報メディア学科・准教授	サウンドの空間認知への影響評価
澤井　淳	栄養生命科学科・教授	食品映像提示と音響効果の基礎研究
原島　恵美子	栄養生命科学科・准教授	栄養教育への感覚協調メディアの応用
澤井　明香	栄養生命科学科・准教授	ヒューマンメディアでのユーザストレスの計測・評価

目　次

研究成果報告及び学外発表論文

(1) 自然なインタラクションを可能とするミクストリアリティシステムの研究　上平　員丈　1

(2) ミクストリアティのための裸眼立体表示方式の研究　谷中　一寿　5

(3) 連続体の変形運動３DCG アニメーション開発のための数理厳密化・計算高速化・生産システム構築に関する研究　服部　元史　9

(4) 仮想空間を用いた学習コンテンツの研究　～没入型空間提示システムを用いた臨場感表現と AR 型ナチュラルインターフェース～　井上　哲理　15

(5) fNIRS を用いた味覚の客観的評価に関する基礎研究～感覚間相互作用に着目して～　高尾　秀伸　23

(6) 超音波センサとスマートフォン内蔵センサを用いた屋内測位基盤の構成法とその実証　田中　博　26

(7) 基盤システム「RT2MOCAP」を用いたモーションメディアシステムの応用～お天気インタラクティブシステム開発～　小島　一成　31

(8) リハビリテーション指導支援のための運動インストラクタ・ロボット・システムの開発　吉野　和芳　35

(9) サウンド提示の感性への効果の研究　西口　磯春、黒川　真毅　39

(10) バイオフィルムおよびバイオファウルリング制御機能付与による分離膜の高機能化および高度利用　澤井　淳　43

(11) 視覚媒体を活用した定量的食事調査法の開発　原島恵美子　47

(12) 精神ストレスおよび日常動作の簡易客観評価のための測定器の開発　澤井　明香　51

学外発表論文　59

自然なインタラクションを可能とするミクストリアリティシステムの研究

研究者名：情報ネットワーク・コミュニケーション学科　上平員丈

１．研究の目的

３Ｄ表示された仮想対象に対し、現実の対象の場合と同様に自然な感覚で相互作用できるミクストリアリティシステムの実現を目的とする。

２．研究の必要性及び従来の研究

3Dディスプレイは単に3D映像の鑑賞用として用いられているだけでなく、その用途は近年拡大しつつある。特に、ユーザが自らの手など身体の一部を使って３Ｄ表示された仮想対象（以下、単に仮想対象とよぶ）に直接操作を加えることができるインタラクティブなシステムは、3Dディスプレイならではの特徴を生かすことができるため、エンタテインメント、遠隔作業、遠隔医療など様々な分野で魅力的な応用の創出が期待されている。

ユーザが自分の身体を使って仮想対象に操作を加えるシステムにおいては、実空間において実際の対象を操作する場合と同様に自然な操作ができることが大切である。仮想対象に対しての「自然な操作」の実現にはいくつかの技術課題がある。特に、ユーザが視覚的に知覚する仮想対象の奥行き位置を取得できる技術の実現は最重要課題の一つである。

これまでに実用化されている3Dディスプレイは両眼視差を利用して観察者に仮想対象の奥行きを知覚させている。このため、従来のインタラクティブシステムにおいて、仮想対象に操作を加えるために、仮想対象の位置情報、特に奥行き方向の位置情報を必要とする場合は、両眼視差に基づいて計算される座標値が用いられてきた。しかし、人間の視覚系に奥行き位置を知覚させる要因は両眼視差だけではないため、両眼視差から求まる奥行き位置は観察者が知覚する実際の奥行き位置とは必ずしも一致しない。また、同一人物でも状況によって異なるとされている。観察者が仮想対象に対して視覚的に知覚する奥行き位置（以下、単に視知覚奥行きとよぶ）をシステムが正しく把握できないと以下の問題が生じる。まず、図１に示すケース１のようにシステムが両眼視差に基づいた計算から求めた奥行きが、観察者の視知覚奥行きよりも手前にある場合、観察者にとっては、自分の手がまだ仮想対象に届いていないのに仮想対象

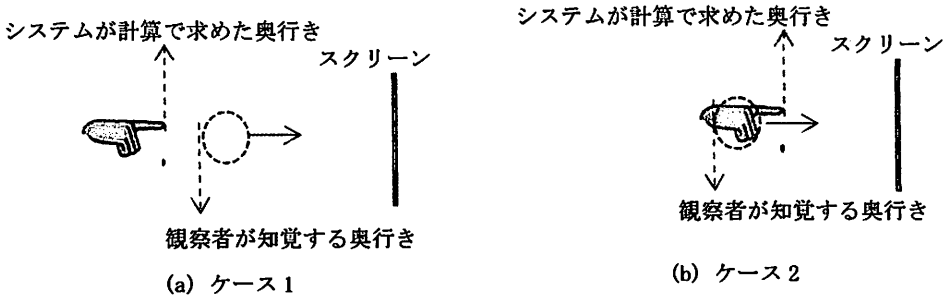


図１　従来法における問題

が反応して動き始めることになる。また、これとは逆のケース２では、観察者が仮想対象に手が触れたと思っても、仮想対象は反応を示さず、手が仮想対象を貫いたのちに反応を示す。また、視覚と同時に触覚や力覚を提示するシステムでは、観察者が仮想対象に触れたと知覚する位置で触覚や力覚を同時に提示することができない。このような状況においては、仮想対象に対して自然な操作を行うことが困難となる。特に、精密作業が要求される応用ではこの問題は深刻となる。

以上のように、従来の3Dディスプレイによるインタラクティブシステムでは仮想対象に対して自然な操作が困難であり、この問題の解決には仮想対象の視知覚奥行きの取得を可能にする技術の実現が不可欠となっている。

３．期待される効果

視知覚奥行きを正確に推定できると上記のように仮想対象と自然な相互作用が可能になる。この結果、３Ｄ画像を用いる各種作業の作業効率を向上させることが可能となる。特に、３Ｄ画像を用いた精密作業において本技術の効果は大である。

４．研究の経過及び結果

本研究では、人間が仮想対象に操作を加えるため仮想対象に向けて手を伸ばすリーチング運動における手の速度と時間の関係、すなわち速度プロファイルから仮想対象の視知覚奥行きの推定を試みる。リーチング運動における速度プロファイルは仮想対象の視知覚奥行きに依存するので、逆にこの速度プロファイルから仮想対象の視知覚奥行きを推定することが可能と考えられる。我々は、これまでの研究において手の速度プロファイルをガウス関数で表すことにより仮想対象の視知覚奥行きを推定可能なことを示した。さらに、具体的な操作として小さな仮想対象を押し上げる操作を取り上げ、上記方法によって視知覚位置を推定することにより作業効率が改善できることを示した。

平成25年度には以下の２項目について研究を進めた。

1） 視知覚奥行きの推定精度の改善。

ガウス関数による近似では、手の速度プロファイルがピーク位置に対して対称性がよい場合は高精度の視知覚奥行の推定が可能であるが、対称性が崩れると推定精度が低くなる。手のリーチング運動は弾道運動と修正運動からなり、修正運動が大きい場合は右裾野が広がった非対称な速度プロファイルとなる。このような場合も対応できる推定法として、（1）式に示すχ^2分布関数を用いる方法を提案し、実験によりその有効性を評価した。

$$v(t) = \frac{a}{2^{k/2}\Gamma(k/2)}(bt+c)^{k/2-1}e^{-(bt+c)/2} + d \qquad (1)$$

ここで，Γはガンマ関数とし，vは手の速度，tは運動時刻，$a, b, c,$ およびdは適合のためのパラメータである．χ^2分布関数は，自由度によってベル型曲線の右裾の形が変化するので、

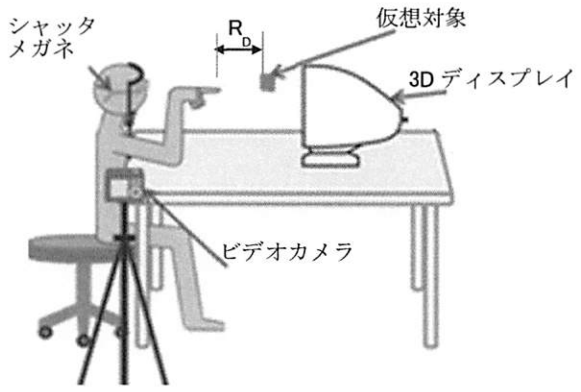


図 2 実験のレイアウト

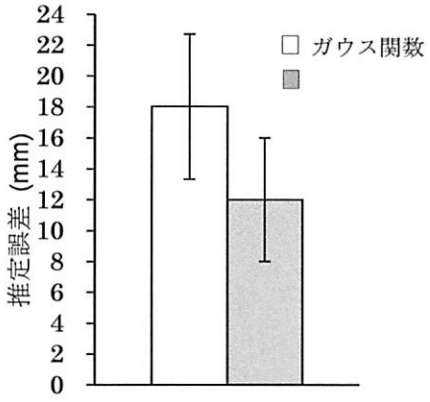


図3　推定精度の測定結果

非対称の速度プロファイルにも適合でき、その結果、視知覚奥行きの推定精度が向上すると期待できる。

図 2 に評価のための実験レイアウトを示す。評価方法は昨年度報告したガウス関数を用いる方法の評価方法と同じである。仮想対象は赤色の正方形とし、大きさは画面上で一辺が 5 cm とした。仮想対象の両眼視差に基づく奥行きは被験者から 40 cm 前方とした。リーチング運動時の観察者の手の速度を測定するためにデジタルビデオカメラを用いた。5 名の被験者が 5 回の試行を行った測定データのうち修正運動が顕著に表れている分析対象の試行は 11 試行あった。推定精度の測定結果を図 3 に示す。図 2 に示す結果から、期待どおり χ^2 分布関数を用いた推定のほうがガウス関数を用いた推定よりも精度が高くなることが明らかになった。

2)　異なる操作に対する本方法の適合性評価

前述の仮想対象を押し上げる操作では、仮想対象に向かって手を伸ばし、仮想対象の視知覚奥行きで手の運動を止めた後に操作を実行した。このため、速度プロファイルから手の速度がゼロになる位置を事前に推定し、この位置を仮想対象の視知覚奥行きとした。しかし、操作の種類によっては仮想対象の位置で手の運動を止めないものもある。例えば、打つ、叩く、突くなどの操作である。これらの種類の操作に対し本方法の適用を検討した。

仮想対象を打つ、叩く、突くなどの操作では、図 4 に実線で示すように仮想対象の位置で手の速度が最大になると予想される。したがって、手の加速度は図 4 に点線で示すように手が仮想対象に向かう途中で最大値をとり、仮想対象に到

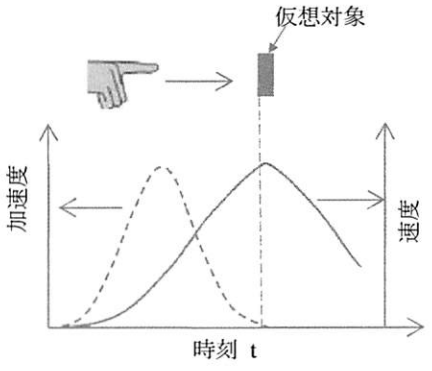


図 4　仮想対象に対し打つ、叩く、突くなどの　操作を行う場合のリーチングにおける手の速度、加速度プロファイル

達した時点でゼロになると考えられる。そこで、加速度プロファイルをガウス関数で近似して、加速度が0となる位置を予測することにより仮想対象の視知覚奥行きを推定することが可能になる。

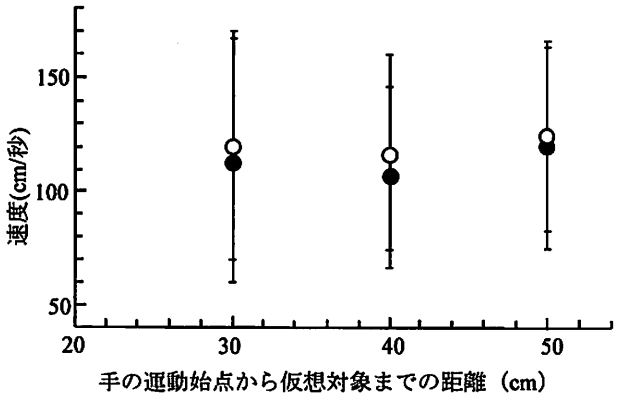


図5 手の最大速度の推定値

上記方法について、速度が最大値となるまえのデータから、速度の最大値を予測できるかを評価した。実験に用いたレイアウトは図2と同じである。手の始動点から仮想対象までの距離R_Dを実験パラメータとし、30、40、50cmを選んだ。被験者には仮想対象を指先で突くように指示をした。手の速度の測定は上記（1）に述べた方法と同じである。被験者は4人で各被験者は上記操作を10回行った。

図5に実験結果を示す。図5から、精度よく最大速度を推定できることがわかる。このことは、最大速度の位置、すなわち仮想対象の視知覚奥行きも精度よく推定できることを意味しており、加速度を用いることにより本方法を打つ、叩く、突くなどの操作においても適応できることが明らかになった。

5．今後の計画

今後は、手で直接操作する作業だけでなくピンセットやハサミなどの道具を介して仮想対象に操作を加える作業などでも本技術の有効性を評価する。

6．研究成果の発表

[1] P. Silapasuphakornwong、M. Suzuki、H. Unno、K. Uehira, "New Technique Using Movements of Users' Bodies to Estimate Positions of 3-D Images That They See", 画像電子学会研究会 (2014.2)

[2] 松島和輝、ピヤラット シラパスパコォンウォン、海野浩、鈴木雅洋、上平員丈、竹田裕一、"リーチング運動における対象の視知覚位置推定技術の精度向上方法の検討", 電子情報通信学会技術報告 (2014.5)

ミクストリアリティのための裸眼立体表示方式の研究

研究者名：情報メディア学科　　谷中　一寿

１．研究の目的

ミクストリアリティにおいて特殊なメガネなしで現実空間と仮想空間とを重ね合わせるための立体表示方式としては，横だけでなく縦方向にも視差を生ずるインテグラルフォトグラフィ（Integral photography，以下 IP と略す)方式が望ましい。特に IP の一種で，かつて筆者らが提案した拡張フラクショナルビュー（Extended Fractional View，以下 EFV と略す）方式を用いれば，安価に高品質な IP が実現できる。ミクストリアリティでは，仮想空間と現実空間の重なる領域が大きいことが望ましく，そのため飛出し量の増大や大画面化などが求められるので，それらに必要なさまざまな技術を確立することを目的とする。

２．研究の必要性及び従来の研究

両眼視差を利用した数ある 3D ディスプレイの中でも 1908 年にリップマンが提案した IP は，ホログラフィにも似た優れた特徴を有する優れた方式であるが，実用化はかなり先と考えられてきた。その理由の一つは，非常に高精細な液晶ディスププレイ（LCD）やそれ専用のフライアイレンズが必要なため，非常に高価なものになってしまうことがある。筆者が提案した EFV 方式を用いれば，図１に示すようにフライアイレンズのピッチと LCD の画素ピッチの比率が整数に限定されないので，安価な既製品で IP を実現することができる。しかしながらこの方式をミクストリアリティに適用するには，立体表示の飛出し量の増大や大画面化をはじめ，解決すべき課題があり，さらなる研究が必要な状況である。

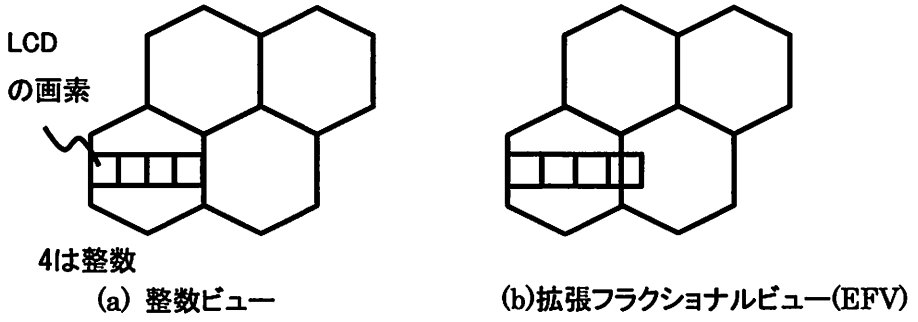


図１　整数ビューと拡張フラクショナルビューの違い

３．期待される効果

本研究によって，従来 EFV 方式で実現されてきたものよりも飛出し量を多く確保でき，

仮想空間と現実空間が重なる領域が広くなるので，インタラクションが容易になる。また，ユーザの操作に応じて実時間で立体表示された物体を動かすことができるようになる。それにより，バーチャルリアリティやミックストリアリティなど，人とコンピュータがより自然にインタラクションを行うことが要求される用途に適用できるようになる。

4．研究の経過及び結果

4．1　フライアイレンズの焦点距離の増大の検討

当初筆者らは，3D プリンタを用いれば焦点距離が長いレンズを安価に作れると考えていた。しかし焦点距離を長くするには，レンズの曲率半径を大きくしなければならず，最新の 3D プリンタを用いても，精度が不十分なことがわかった。そこで方針を転換し，フライアイレンズを，屈折率が空気とレンズ素材との中間であるような液体（水）に浸すことで，等価的な焦点距離を伸ばした。

4．2　拡張フラクショナルビュー方式の GPU による高速化[1]

EFV 方式の IP 画像を CG を用いて制作する場合，たとえば縦 32×横 32＝1024 視点といった多くの視点から 3D シーンをレンダリングし，それらを用いて IP 画像を合成する必要があるので，計算量が多い。そのため事前に時間をかけてレンダリングできるムービーには適用できても，実時間処理が要求される用途への適用は困難であった。CPU のみで処理する場合に比べ，GPU(Graphics Processing Unit)による処理を導入すれば，処理速度を大幅に向上できる。この場合，図 2 に示すような手順のうち，前半の多視点レンダリングは GPU で高速化できるが，後半の IP 画像の合成に今まで使われていたアルゴリズムでは，LCD の画素単位の並列処理に向かないため GPU の適用が困難であったので，LCD の画素ごとに独立に処理できるアルゴリズムを適用し，どのような GPU を用いればどの程度の処理能力が得られるかを実測した。

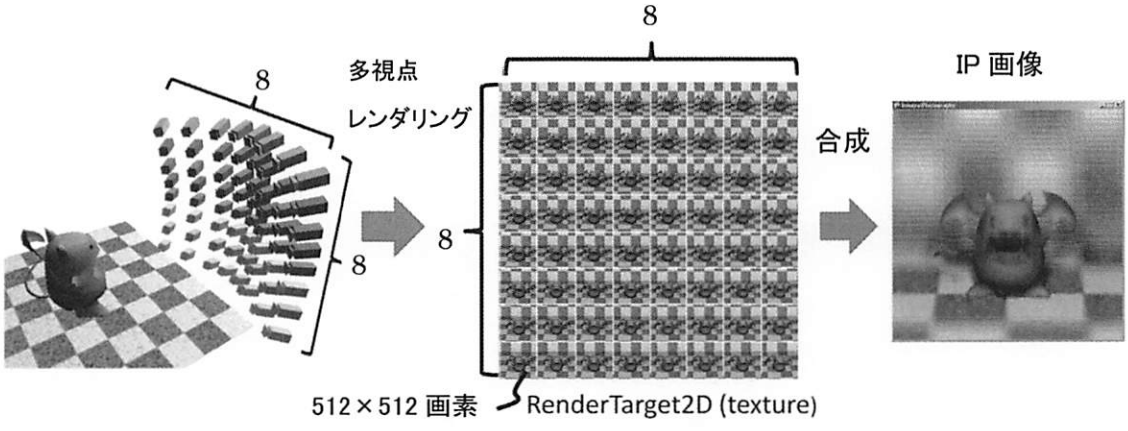


図 2　多視点レンダリングと IP 画像合成

図 3 は実験システムの概観である。画像がさらに大きい場合でも，60fps 以上が得られることがわかった。

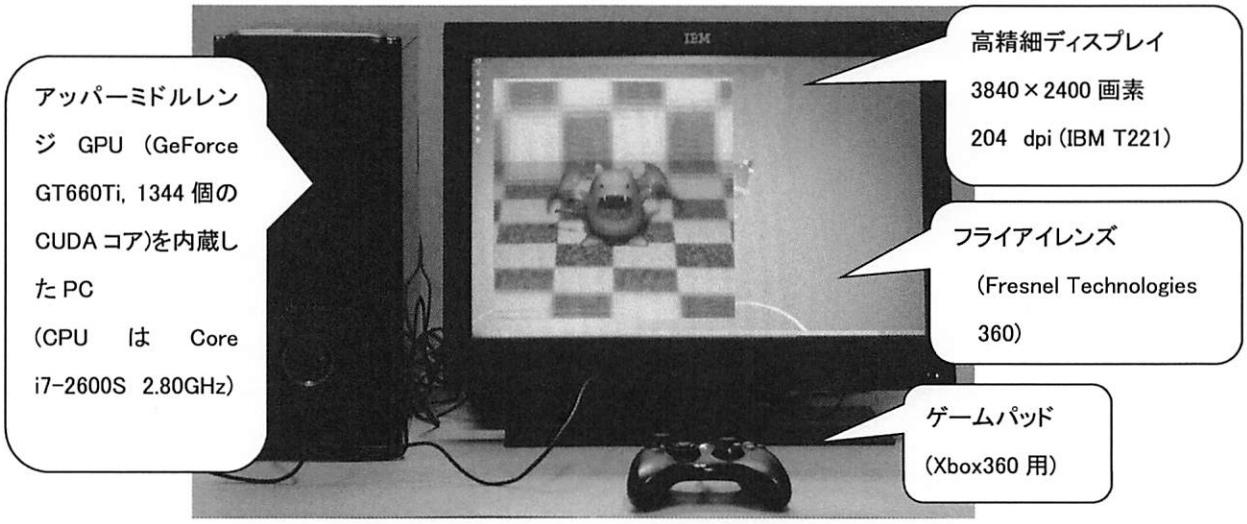


図３　GPU で加速されたインタラクティブなインテグラルフォトグラフィシステム

図４にキャラクタ数とフレームレートの関係を３種の GPU について示す。この場合 IP 画像には 512×512 画素とやや小さめにした。956 ポリゴンからなる「CatBatDeamon」と名づけられたキャラクタの数を変えて測定した。その結果，キャラクタの数が少なければ，CPU に内蔵された GPU (EU の数は 6) でも，IP 画像のレンダリングが大幅に高速化され，実時間レンダリングが可能であることがわかった。

GPU の導入によって，一般に GPU の性能が高ければ高いほど，物体の動きは滑らかになり，ゲームや仮想現実など高画質と厳しい実時間処理が要求される用途に，より適するようになることがわかった。

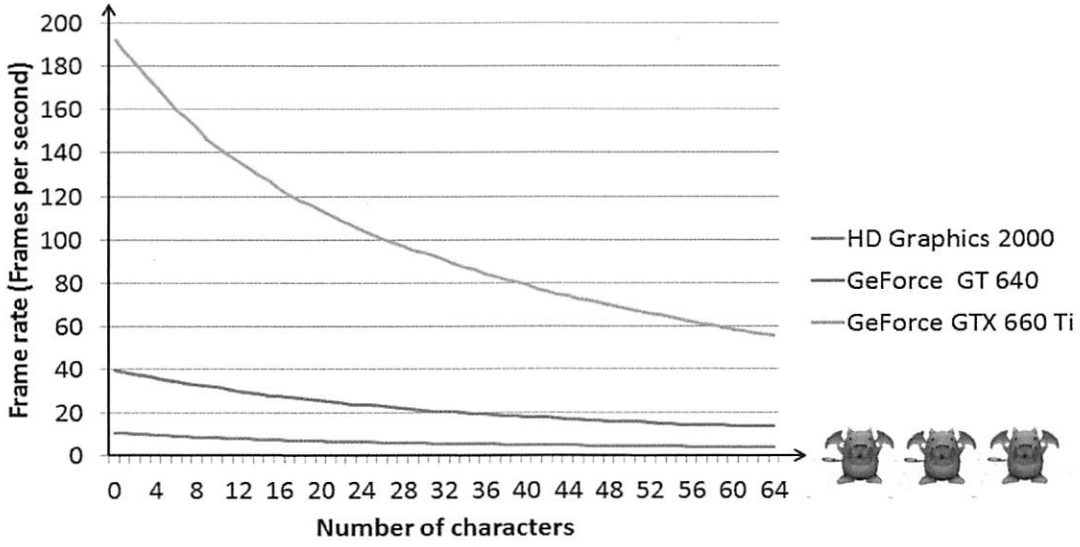


図４　キャラクタ数とフレームレートの関係

４．３　WebGL を用いた実在の書店をエミュレートするオンライン書店の陳列法[2]

近年インターネットショッピングが普及しており，ネット書店を利用する機会が増えている。実在の書店では，店頭に陳列された本を一瞥しただけで，どの本が売れ筋であるのか，またどの本がおすすめであるのかがわかる。これに対し，ネット書店では，どの本も並列に表示されるので，わかりにくい。そこで現実の書店の書棚をエミュレートした，オンライン書店の陳列法を WebGL で構築した。現段階では普通の 3DCG なので両眼視差は得られないが，今後機能を拡張し，立体視に対応してゆきたいと考えている。

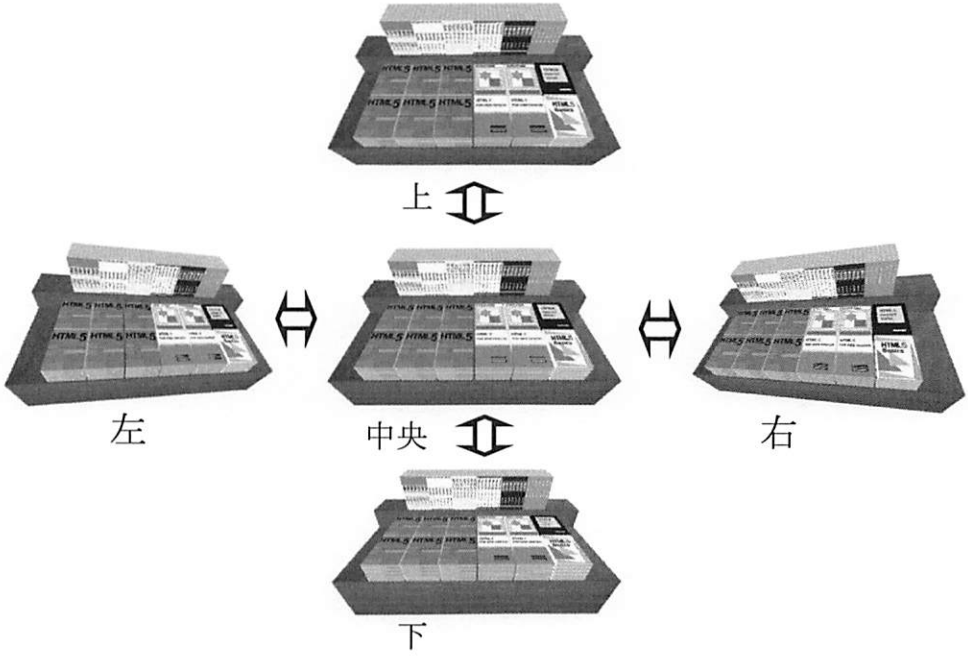


図５　マウス操作による視点の変更

５．今後の計画

裸眼立体表示については，引き続き，飛出し量を増やすための検討を進める予定である。

CG による立体画像の実時間表示については，GPU を活用することが極めて有効であることがわかった。今後，近年注目されている WebGL を用いることによって，ネット環境でも Web ブラウザでインタラクティブな立体表示ができるようにしてゆきたいと考えている。

実写による立体画像制作については，より解像度の高いビデオカメラの採用と，レンズ系の歪補正アルゴリズムの適用により，高画質化を目指す予定である。

６．研究成果の発表

[1]Kazuhisa Yanaka, Sho Kimura: GPU accelerated interactive integral photography system using extended fractional view method. SIGGRAPH 2013 Posters, July 2013.

[2] Kazuhisa Yanaka, TerumichiIizuka: Display Method for Online Bookstore Emulating Real Bookstore by WebGL, Journal of Electronic Science and Technology, Vol.12, No. 1, pp.59 - 63, March 2014.

連続体の変形運動3 DCGアニメーション開発のための数理厳密化・計算高速化・生産システム構築に関する研究

情報メディア学科　　服部元史

1 研究の目的

大海原における嵐の光景を映画に描画したり、池の上で水飛沫 (みずしぶき) を上げながら闘っている格闘者達を Video Game に描画したりするためには、飛び散る飛沫 (しぶき) や砕ける波などの 3DCG Animation を 流体力学シミュレーションに基づいて作成する技術が有効である。このように分離や融合を繰り返す液体の運動は、自由表面 (移動する自由な境界) を有する Navier-Stokes 流体運動方程式で記述される。このような自由境界の変形運動まで捕捉しながら Navier-Stokes 方程式を数値計算できる技法として、粒子法 Moving Particle Semi-implicit (MPS) が越塚誠一教授 (東京大学 工学系) によって 1995 年頃に提唱され、その後も様々な大学や企業で研究され 改良が加えられ続けている。この粒子法 MPS の Algorithm を Navier-Stokes 方程式の数学理論に基づいて検討し直し、計算結果の精度を向上させたり 計算速度を速めたりする事を通じて、流体運動の 3DCG Animation を生産するシステムを構築して行く事が本研究の目的である。

2 研究の必要性及び従来の研究

CG 業界への応用だけでなく CAE 産業界への応用も盛んな 粒子法 MPS であるが、流体粒子の速度と位置が適切に計算されるにもかかわらず、計算される圧力の時系列が数値的に振動する (高い周波数の雑音を含んでしまう) という欠点を生じた。この欠点を修正するべく、粒子法 MPS の圧力 Poisson 方程式の Source 項に補正項を追加する手法が、南佳成研究員 (海洋技術安全研究所, 2007) らによって提案され、広く使用されるに至っている。

計算される圧力の時系列が数値的に安定化できる (高い周波数の雑音を除去できる) 効果が得られるため heuristic に付加された補正項であるが、その物理的な根拠が不明であったため 数値計算手法の正当性が明確では無かった。

そこで 粒子法 MPS の圧力 Poisson 方程式の Source 項に付加された補正項の物理的な意味を、流体運動方程式 (Navier-Stokses 方程式) の数学理論に基づいて本研究で検討する。

3 期待される効果

粒子法 MPS で圧力を計算する 圧力 Poisson 方程式を越塚誠一教授が最初に導出するにあたっては、液体の非圧縮性を考慮し 質量密度が一定値である前提に基づいて、Navier-Stokses 流体運動方程式 と 質量保存の連続の式 から圧力 Poisson 方程式が導出されていた。

流体粒子の 速度, 位置, 圧力を 粒子法 MPS で数値計算するにあたり時間発展は差分法によって計算されるため、現在の時刻 s における 流体粒子の 速度, 位置, 圧力の数値が計算済みである状況の下で将来の時刻 $t = s + \Delta s$ における 流体粒子の 速度, 位置, 圧力の数値を計算する。時刻 s, t などの各節目の time step において 粒子法 MPS では非圧縮性が成立しているが (非圧縮性を成立させるように 流体粒子の位置と圧力とを計算しているが)、現在の時刻 s から将来の時刻 $t = s + \Delta s$ までの間の中間的な時間区間 $[s, t]$ において圧縮した状態にある事が粒子法 MPS の特徴である。

この中間的な時間区間 $[s, t]$ における圧縮した状態を考慮し越塚誠一教授が最初に導出された時よりも高い近似で 質量保存の連続の式を扱いながら、本研究で圧力 Poisson 方程式を導出したところ、上記の補正項まで込めて導出する事に成功した。圧力 Poisson 方程式の Source 項に付加されて来た補正項は、heurisutic な経験則だけに根拠を有するものではなく、Navier-Stokses 流体運動方程式 と 質量保存の連続の式 から物理的に導出できるものである事を、本研究で明らかにした。

粒子法 MPS で近似的に計算される 流体粒子の位置, 速度, 圧力が Navier-Stokses 流体運動方程式の厳密解に収束する事を、数学理論として証明できる可能性を本研究成果は示唆している。Navier-Stokses 方程式への数値計算手法としては、近似解が厳密解に収束する事が保証されている事が理論的にも実用的にも望ましいため、この収束性を証明するべく 粒子法 MPS を数学的に検討して行く。

4 研究の経過及び結果

4.1 流体粒子に基づいた Lagrange 物質座標

分離したり融合したりを繰り返す複雑な液体の変形運動を、自由境界を有する Navier-Stokes 流体運動方程式に基づいて数値計算する。初期時刻 $t = 0$ における流体粒子の位置 $\xi = \left(\xi_x, \xi_y, \xi_z\right)$ に基づいた Lagrange 物質座標に基づい

て、自由境界 Navier-Stokes 方程式を表現する。初期時刻 $t = 0$ における流体粒子 $\xi = \left(\xi_x, \xi_y, \xi_z\right)$ の全てから構成される集合を Ξ_{liquid} とおく。初期時刻 $t = 0$ における液体の形状 (初期時刻 $t = 0$ における流体の領域) は Ξ_{liquid} で表わされる。

流体粒子 $\xi = \left(\xi_x, \xi_y, \xi_z\right)$ が時刻 $t \geq 0$ において到達している位置を $u(t,\xi) = \left(u_x(t,\xi), u_y(t,\xi), u_z(t,\xi)\right)$ で表わす。すると $u(0,\xi) = \xi$ である。時刻 $t \geq 0$ における液体の形状 (時刻 $t \geq 0$ における流体の領域) は、$u(t) = \left(u(t,\xi)\,;\, \xi \in \Xi_{\text{liquid}}\right)$ で表わされる。流体粒子 $\xi = \left(\xi_x, \xi_y, \xi_z\right)$ が時刻 $t \geq 0$ において有している速度を $v(t,\xi) = \left(v_x(t,\xi), v_y(t,\xi), v_z(t,\xi)\right)$ で表わす。流体粒子 $\xi = \left(\xi_x, \xi_y, \xi_z\right)$ が時刻 $t \geq 0$ において到達している位置の周辺における液体の質量密度を $\rho(t,\xi)$ で表わす。流体粒子 $\xi = \left(\xi_x, \xi_y, \xi_z\right)$ が時刻 $t \geq 0$ において到達している位置の周辺における液体の圧力を $p(t,\xi)$ で表わす。

流体の体積が膨張したり縮小したりする事に依存して、液体の質量密度は The mass density $\rho(t,\xi)$ depends the volume expansion as

$$\rho(t,\xi) = \frac{\rho_0}{\det\left(\frac{\partial u(t,\xi)}{\partial \xi}\right)} \tag{1}$$

のように表わされる。

4.2 Lagrange 物質座標による Navier-Stokes 流体運動方程式

初期時刻における位置でラベル化された流体粒子

$$\xi \in \Xi_{\text{liquid}} \tag{2}$$

に対する、Navier-Stokes 方程式

$$\frac{D\,v(t,\xi)}{Dt} = \frac{\mu}{\rho(t,\xi)} \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial^2 v(t,\xi)}{\partial u_i(t,\xi)^2} - \frac{1}{\rho(t,\xi)} \frac{\partial p(t,\xi)}{\partial u(t,\xi)} + g \tag{3}$$

$$\frac{D\,u(t,\xi)}{Dt} = v(t,\xi) \tag{4}$$

と、質量保存による連続の式

$$0 = \frac{D\,\rho(t,\xi)}{Dt} + \rho(t,\xi) \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial v_i(t,\xi)}{\partial u_i(t,\xi)} \tag{5}$$

によって、液体の変形運動を数値計算する。但し $g = \left(0, 0, -9.81[\text{m/s}^2]\right)$ は重力加速度を表わしている。

Lagrange 物質座標 xi に依存する形で ξ 速度 v, 位置 u, 質量密度 ρ が表わされているため、Lagrangie 時間微分 D/Dt は 時間 t による偏微分 $\partial/\partial t$ と一致する i.e.

$$\frac{D\,v(t,\xi)}{Dt} = \frac{\partial v(t,\xi)}{\partial t} \quad \frac{D\,u(t,\xi)}{Dt} = \frac{\partial u(t,\xi)}{\partial t} \quad \text{etc.} \tag{6}$$

である。しかし $D\rho/Dt = D\,\rho(t,\xi)/Dt = \partial\rho(t,\xi)/\partial t$ でありながらも $D\rho/Dt \neq \partial\rho(t,u)/\partial t$ である事を明確に認識するために、本稿では D/Dt の表記法を使用する。

粒子法 Moving Particle Semi-implicit (MPS) を始めて提案された越塚誠一教授による定式化では Lagrange 物質座標 ξ や 時刻と共に変化して行く流体粒子の位置による偏微分 $\partial/\partial u(t,\xi)$ は明示されていないが、数学的な議論を明確にして行くために本稿では ξ と $\partial/\partial u(t,\xi)$ とを積極的に明示しながら方程式を記述する。

固定された壁面の固体粒子

$$\xi \in \Xi_{\text{solid}} \tag{7}$$

に対する

$$v(t,\xi) = 0 \tag{8}$$

$$u(t,\xi) = \xi \tag{9}$$

$$\rho(t,\xi) = \rho_0 \tag{10}$$

によって境界条件が表現される。但し 固定壁面の固体粒子 $\xi \in \Xi_{\text{solid}}$ における内側の流体領域に向けての法線ベクトル (長さが 1 に規格化された単位法線ベクトル) を $\sigma(\xi)$ で表わす。

固定された壁 Ξ_{solid} に属する固体粒子 ξ は、$v(t,\xi) = 0$ の如く速度が 0 である流体粒子 ξ であると見做す事もできる。この場合に時間 t がいくら経過しても、速度が 0 である流体粒子と見做されている壁面の固体粒子 ξ の位置は決して変化し無いため、$u(t,\xi) = \xi$ という事に成る。

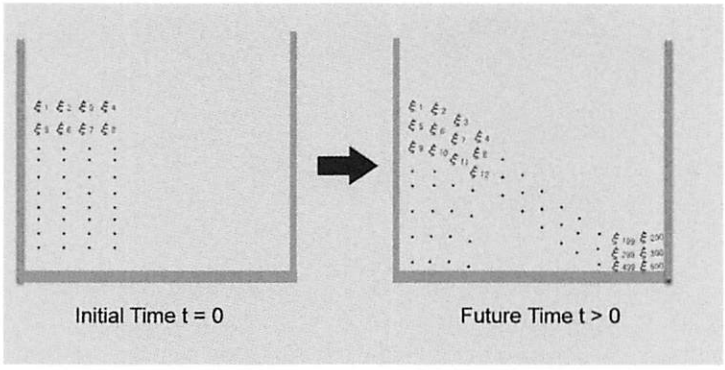


Figure 1: Spatial discretization by many particles.

4.3 非圧縮な流れに対する時間発展 Scheme

変形運動する液体の速度として、流体内部を伝わる音の速さよりも遥かに小さい場合を想定しているため、非圧縮な流れとして近似し

$$1 = \det\left(\frac{\partial u(t,\xi)}{\partial \xi}\right) \tag{11}$$

と見做すため、質量密度 $\rho(t,\xi)$ も定数 ρ_0 に成るものと見做し

$$\rho(t,\xi) = \rho_0 \tag{12}$$

のように近似する。

時間発展については差分法で数値計算する。時間の刻み幅 (sampling time) を Δt で表わす。離散的な時刻 $t = n\,\Delta t$ において、位置 u, 速度 v, 圧力 p が数値計算される。

$n = 0, 1, 2, \cdots$ は離散時刻である。位置 $u(n\,\Delta t,\ \xi)$ に対する近似値を $U[n](\xi)$ で表わし、速度 $v(n\,\Delta t,\ \xi)$ に対する近似値を $V[n](\xi)$ で表わし、圧力 $p(n\,\Delta t,\ \xi)$ に対する近似値を $P[n](\xi)$ で表わし、質量密度 $\rho(n\,\Delta t,\ \xi)$ に対する近似値を Rho$[n](\xi)$ で表わす。

数値計算の Algorithm が確立される最終段階においては、位置 $U[n]$, 速度 $V[n]$, 圧力 $P[n]$ は

$$\frac{V[n+1]-V[n]}{\Delta t} = \frac{\mu}{\mathrm{Rho}[n]}\sum_{i=x,y,z}\frac{\partial^2 V[n]}{\partial U_i[n]^2} - \frac{1}{\mathrm{Rho}[n+1]}\frac{\partial P[n+1]}{\partial U[n+1]} + g \tag{13}$$

$$\frac{U[n+1]-U[n]}{\Delta t} = V[n+1] \tag{14}$$

のように 離散時間 Navier-Stokes 方程式を満たす必要があるし、質量密度 Rho$[n]$ は

$$\rho_0 = \mathrm{Rho}[n] = \mathrm{Rho}[n+1] \tag{15}$$

のように非圧縮性を満たす必要がある。

このような最終的に満たされるべき 式 (13), 式 (14), 式 (15) が成立するように、将来の離散時刻 $n+1$ における位置 $U[n+1]$, 速度 $V[n+1]$, 圧力 $P[n+1]$, 質量密度 Rho$[n+1]$ を現在の離散時刻 n での 位置 $U[n]$, 速度 $V[n]$, 圧力 $P[n]$, 質量密度 Rho$[n]$ に基づいて、次のように計算して行く。

4.4 次の時刻 $n+1$ での圧力 $P[n+1]$ を計算するための 圧力 Poisson 方程式

越塚誠一教授によって始めて粒子法 MPS が提唱された時から次の時刻の圧力は 圧力 Poisson (偏微分) 方程式の解として計算されていた。本稿では、現在の時刻 n と 次の時刻 $n+1$ との間の中間的な計算 Process において粒子法 MPS は圧縮な流れに突入している事に注目し、以下において 圧力 Poisson (偏微分) 方程式を導出し直す。

圧力による効果を無視して、粘性と重力による効果だけを考慮して

$$\frac{V^* - V[n]}{\Delta t} = \frac{\mu}{\mathrm{Rho}[n]}\sum_{j=x,y,z}\frac{\partial^2 V[n]}{\partial U_j[n]^2} + g \tag{16}$$

によって 仮の速度 V^* を計算する。仮の速度 V^* に基づき

$$\frac{U^* - U[n]}{\Delta t} = V^* \tag{17}$$

によって、仮の位置 U^* を計算する。

最終的に満たされるべき離散時間 Navier-Stokes 方程式 (13) と比較する事によって、圧力 $P[n+1]$ (現時点では数値は未知である) による効果を 式 (16) に取り入れるべく、速度の修正量 V' , 位置の修正量 U' , 仮の質量密度 $\mathrm{Rho}^*(\xi)$ を

$$V[n+1] = V^* + V' \tag{18}$$

$$U[n+1] = U^* + U' \tag{19}$$

のように導入する。但し

$$\frac{V'}{\Delta t} = \frac{-1}{\mathrm{Rho}[n+1]} \frac{\partial P[n+1]}{\partial U[n+1]} \tag{20}$$

$$\frac{U'}{\Delta t} = V' \tag{21}$$

$$\mathrm{Rho}^*(\xi) = \frac{\rho_0}{\det\left(\frac{\partial U^*(\xi)}{\partial \xi}\right)} \tag{22}$$

である。

式 (16) と 式 (20) とを加え合わせる事で離散時間 Navier-Stokes 方程式 (13) を得る。式 (17) と (21) とを加え合わせる事で離散時間 Navier-Stokes 方程式 (14) を得る。

式 (20) より $j = x,y,z$ に対して

$$\frac{V'_j}{\Delta t} = (-1)\,\mathrm{Rho}[n+1]^{-1} \frac{\partial P[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \tag{23}$$

を得る。この両辺を $U_j[n+1]$ で偏微分することによって

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\Delta t} \frac{\partial V'_j}{\partial U_j[n+1]} \\ &= \mathrm{Rho}[n+1]^{-2} \frac{\partial\, \mathrm{Rho}[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \frac{\partial P[n+1]}{\partial U_j[n+1]} + (-1)\,\mathrm{Rho}[n+1]^{-1} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_j[n+1]^2} \end{aligned} \tag{24}$$

を得る。従って

$$\begin{aligned} &\frac{\mathrm{Rho}[n+1]}{\Delta t} \frac{\partial V'_j}{\partial U_j[n+1]} \\ &= \mathrm{Rho}[n+1]^{-1} \frac{\partial\, \mathrm{Rho}[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \frac{\partial P[n+1]}{\partial U_j[n+1]} + (-1) \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_j[n+1]^2} \end{aligned} \tag{25}$$

を得る。これらの両辺を $j = x,y,x$ について加え合わせる事によって

$$\frac{\mathrm{Rho}[n+1]}{\Delta t} \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V'_j}{\partial U_j[n+1]} \tag{26}$$

$$= \frac{1}{\mathrm{Rho}[n+1]} \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial\, \mathrm{Rho}[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \frac{\partial P[n+1]}{\partial U_j[n+1]} + (-1) \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_j[n+1]^2} \tag{27}$$

を得る。

質量保存による連続の式を時間について離散化する事で

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{D\rho}{Dt}[n+1] + \mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \\ &= \frac{\mathrm{Rho}[n+1] - \mathrm{Rho}[n]}{\Delta t} + \mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \end{aligned} \tag{28}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\mathrm{Rho}[n+1] - \mathrm{Rho}^*}{\Delta t} + \frac{\mathrm{Rho}^* - \mathrm{Rho}[n]}{\Delta t} \\ &\quad + \mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V^*_j}{\partial U_j[n+1]} + \mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V'_j}{\partial U_j[n+1]} \end{aligned} \tag{29}$$

および

$$0 = \frac{\mathrm{Rho}^* - \mathrm{Rho}[n]}{\Delta t} + \mathrm{Rho}^* \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \tag{30}$$

とを得る。これらの式 (29) と 式 (30) との差を求める事で

$$\begin{aligned} 0 \;=\; & \frac{\mathrm{Rho}[n+1] - \mathrm{Rho}^*}{\Delta t} \\ & + \mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j[n+1]} - \mathrm{Rho}^* \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \\ & + \mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j'}{\partial U_j[n+1]} \end{aligned} \tag{31}$$

を得る。両辺を Δt で割る事によって

$$\begin{aligned} 0 = \; & \frac{\mathrm{Rho}[n+1] - \mathrm{Rho}^*}{(\Delta t)^2} \\ & + \frac{1}{\Delta t}\left(\mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j[n+1]} - \mathrm{Rho}^* \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \right) \\ & + \frac{\mathrm{Rho}[n+1]}{\Delta t} \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j'}{\partial U_j[n+1]} \end{aligned} \tag{32}$$

を得る。

式 (27) と 式 (32) によって

$$\begin{aligned} \sum_{i=x,y,z} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_i[n+1]^2} \;=\; & \frac{\mathrm{Rho}[n+1] - \mathrm{Rho}^*}{(\Delta t)^2} \\ & + \frac{1}{\Delta t}\left(\mathrm{Rho}[n+1] \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j[n+1]} - \mathrm{Rho}^* \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \right) \\ & + \frac{1}{\mathrm{Rho}[n+1]} \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial\, \mathrm{Rho}[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \frac{\partial P[n+1]}{\partial U_j[n+1]} \end{aligned} \tag{33}$$

のごとく 圧力 Poisson 方程式の第 1 形体を得る。ここで $\mathrm{Rho}[n+1] = \rho_0$ (constant) であるから、

$$\sum_{i=x,y,z} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_i[n+1]^2} = \frac{\rho_0 - \mathrm{Rho}^*}{(\Delta t)^2} + \frac{1}{\Delta t}\left(\rho_0 \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j[n+1]} - \mathrm{Rho}^* \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \right) \tag{34}$$

のように 圧力 Poisson 方程式の第 2 形体を得る。

この 圧力 Poisson 偏微分方程式 (34) を流体領域 $U[n+1]$ の境界条件も考慮して解く事によって、次の時刻の圧力 $P[n+1]$ を計算する。

4.5 圧力 Poisson 方程式の Source 項を整理する

越塚誠一教授による粒子法 MPS において 圧力 Poisson 方程式が導出された時にも使用された空間偏微分に対する近似を、式 (34) に対して使用する事によって

$$\sum_{i=x,y,z} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_i[n+1]^2} = \frac{\rho_0 - \mathrm{Rho}^*}{(\Delta t)^2} + \frac{1}{\Delta t}\left(\rho_0 \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} - \mathrm{Rho}^* \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \right) \tag{35}$$

を得る。従って

$$\sum_{i=x,y,z} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_i[n+1]^2} = \frac{\rho_0 - \mathrm{Rho}^*}{(\Delta t)^2} + \left(\frac{\rho_0 - \mathrm{Rho}^*}{\Delta t} \right) \sum_{j=x,y,z} \frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*} \tag{36}$$

つまり

$$\sum_{i=x,y,z} \frac{\partial^2 P[n+1]}{\partial U_i[n+1]^2} = (\rho_0 - \mathrm{Rho}^*)\left(\frac{1}{(\Delta t)^2} + \frac{1}{\Delta t}\sum_{j=x,y,z}\frac{\partial V_j^*}{\partial U_j^*}\right) \tag{37}$$

のように Source 項が整理された 圧力 Poisson 方程式を得る。

5 今後の計画

粒子法 MPS で近似的に計算される 流体粒子の位置, 速度, 圧力が Navier-Stokses 流体運動方程式の厳密解に収束する事を、数学的に証明する事を今後の研究計画とする。もしくは、粒子法 MPS で近似的に計算される 流体粒子の位置, 速度, 圧力が Navier-Stokses 流体運動方程式の厳密解に収束するように、粒子法 MPS を改良して行く事を、今後の研究計画とする。

Navier-Stokes 方程式の数学理論によって 粒子法 MPS を更に深く検討して行くにあたっては、Lagrange 物質座標による記述を今まで以上に明示的に使用して行く事が望ましい。液体が変形運動する場所として 2 次元の平面や 3 次元の空間に含まれる領域を想定するため、次元を Dim という変数で表わし

$$\mathrm{Dim} = 2, 3 \tag{38}$$

とする。過去の時刻 $s > 0$ に位置 $x = (x_1, x_2, \cdots, x_{\mathrm{Dim}}) \in \mathrm{R}^{\mathrm{Dim}}$ に居た流体粒子が、流れに沿って移動して、将来の時刻 $t(> s)$ に位置 $z = (z_1, z_2, \cdots, z_{\mathrm{Dim}}) \in \mathrm{R}^{\mathrm{Dim}}$ まで移動した時に、このような流体粒子の移動を then we write

$$z = u(t/s, x). \tag{39}$$

のように表わす。過去の時刻 s に位置 x に居た流体粒子が、将来の時刻 $t(> s)$ に位置 z まで移動した時に有している速度を

$$v(t, z/s, x) = v(t/s, x) = v(t, z) \tag{40}$$

のように表わす。過去の時刻 s に位置 x に居た流体粒子が、将来の時刻 $t(> s)$ に位置 z まで移動した時に有している加速度を

$$a(t, z/s, x) = a(t/s, x) = a(t, z) \tag{41}$$

のように表わす。

すると Navier-Stokes 流体運動方程式は

$$z = u(t/s, x) \tag{42}$$

$$\frac{D\,u(t/s,x)}{Dt} = v(t/s, x) \tag{43}$$

$$a(t/s,x) = \frac{D\,v(t/s,x)}{Dt} = \frac{\mu}{\rho(t/s,x)}\sum_{i=1}^{\mathrm{Dim}}\frac{\partial^2 v(t,z/s,x)}{\partial {z_i}^2} - \frac{1}{\rho(t/s,x)}\frac{\partial p(t/s,x)}{\partial z} + g \tag{44}$$

のように表わされる。このような Lagrange 物質座標による記述を駆使し、過去の時刻 s から未来の時刻 t までの短い時間の間に移動する流体粒子の運動を数学的に明確に表現しながら、粒子法 Moving Pariticle Semi-implicit を更に深く今後に探求して行く。

6 研究成果の発表

- "粒子法 MPS 流体力学シミュレーションにおける圧力 Poisson 方程式の導出 (A derivation of the pressure Poisson equation in Moving Particle Semi-implicit method)", 服部元史, 日本数学会 実函数論・函数解析学 合同シンポジウム 第 52 回 講演会論文集, pp.65-70, 2013 年 9 月 4 日 (水)〜6 日 (金), 青山学院大学 相模原キャンパス
- "粒子法 Moving Particle Semi-implicit における中間的な圧縮状態を考慮した圧力 Poisson 方程式の導出 (Derivation of the pressure Poisson equation in Moving Particle Semi-implicitmethod considering the intermediate compressible procedure)", 服部元史, 殿岡芳規, 中島祐貴, 柴田和也, 越塚誠一セッション E-6 <メッシュフリー法／粒子法の基礎および関連技術一 (1) >計算工学講演会論文集 第 18 巻, E-6-1, 2013
- "The boundary condition of the Poisson type equation in MPS", Motofumi Hattori, Yoshinori Tonooka, Yuki Nakajima (Kanagawa Institute of Technology) and Kazuya Shibata, Seiichi Koshizuka (The University of Tokyo), Session 5 (Physics-based Simulation) [5-5], pp. 115 - 118, Proceedings of NICOGRAPH International 2013, June 2-3, 2013,

仮想空間を用いた学習コンテンツの研究
没入型空間提示システムを用いた臨場感表現とAR型ナチュラルインタフェース

研究者名：情報ネットワーク・コミュニケーション学科　井上哲理

1. 研究の目的

本研究プロジェクトでは，「立体表現メディア技術」，「仮想空間入出力メディア技術」，「感覚協調メディア技術」などの次世代ヒューマンメディア技術の応用として，学習・訓練場面を対象として，そこでのメディアの効果的な活用やそのためのインタフェースの検討，学習・訓練効果の評価手法を主なテーマとしている．特にヒューマンメディア入出力インタフェースを介しての対象に対する直接体験化に基づく学習効果の向上が可能な学習コンテンツの提案を目指して，コンテンツ作成，入出力技術開発，学習・訓練効果の評価を継続して行っている．これらの研究をとおして，学習環境の発展に資する次世代ヒューマンメディア技術の技術体系を創出することを目指している．

本研究課題は本研究プロジェクトの中で，没入型空間提示システムが提示する高臨場感仮想空間の応用と評価，および映像，音声，触覚・力覚提示等による感覚協調メディアの応用をテーマとしている．今年度は次の３つを中心に研究を行った．

(1) 没入型空間提示システムを用いた高所表現の基礎研究（２）

没入型空間提示ディスプレイでの仮想空間映像に対してユーザが感じている臨場感や没入感を高める要因を明らかにすることを目的とした研究である．昨年度に引き続き「高所感」を対象として，ディスプレイの種類や映像内容を変化させて高所感の違いを調べた．

(2) 仮想空間を用いた室内での揺れ感覚に関する基礎研究

乗り物で感じる車内の揺れ，室内・屋外で感じる地震の揺れの感覚を映像のみで表現できるか，ユーザに強く感じさせる要因は何かを調べてコンテンツ制作へ応用する研究である．これまで乗り物に対する揺れの研究を行ってきた．今年度は，地震による室内での揺れを表現できるかを調べた．

(3) ステレオ画像処理を用いたAR画像内での対象選択インタフェース

現実空間とCG空間を合成したAR画像に関して，ビデオシースルー型頭部搭載ディスプレイ（HMD）利用時に，操作対象を選択する方法としてユーザ自身の手指の動きをビデオ画像処理から解析するインタフェースを検討した．

2. 研究の必要性および従来の研究

本研究プロジェクトは立体映像，仮想空間技術，感覚協調メディア技術などの，次世代ヒューマンメディアの有用性を実応用において示すことを目指したものである．従来の研究はヒューマンメディア技術そのものの開発や特性評価を中心としていたが，本プロジェクトでは具体的な応用として学習・訓練場面を想定した応用研究を進めている点が特徴である．

ヒューマンメディア研究プロジェクトにおいて，本研究課題では，没入型空間提示システムおよび感覚協調メディアの可能性の評価と応用コンテンツの制作を主なテーマしている．具体的に

は，リアリティに富んだ仮想環境の構築・提供が期待できる没入型空間提示システムを用いたコンテンツの制作と，コンテンツに対するユーザ反応の評価から実応用への研究を進めている．研究では，特に学習・訓練への応用については，具体的なコンテンツを用いた研究が必要との考えのもと研究を進めている．また，本研究課題では映像提示に触覚・力覚情報提示を応用する研究もテーマとしている．映像では伝達が難しい，柔らかい・硬い，重い・軽いなどの感覚を簡易な方法で提示できれば，例えば，料理・食品映像による食育，栄養管理教育への応用方法も広がることが期待できる．

3. 期待される効果

本研究プロジェクトは次世代ヒューマンメディア技術を学習・訓練場面に効果的に応用することを目指しているが，仮想環境が実体験と同等の体験を提供可能だとすると，学習・訓練への応用は期待が大きい．リアリティに富んだ仮想環境と体験感に富んだコンテンツを用いて学習効果の向上が期待できる．

また本研究課題が取り組んでいる学習・訓練用メディアへの触覚・力覚メディアの利用では，映像のみではなく，映像とサウンド，映像と振動のように，複数の感覚を組み合わせることで，対象の認知向上や印象変化により学習・訓練への応用を目指したものであり，新しい応用分野と言える．

4. 研究の経過及び結果

4.1 没入型空間提示システムを用いた高所表現の基礎研究（2）

(1) はじめに

本研究の目的は，没入型空間提示ディスプレイを用いて，ビル上階から眼下を望む場合などに，高所感覚をユーザが強く感じるコンテンツの映像内容や提示条件を検討することであり，また高所表現コンテンツに対してユーザがどのような反応をするのかを調べることである．これらの結果を，第一には高所感が有効に活用できる分野に応用することを目標としている．また，高所感のような実在感覚を生起する映像条件を知る上での知見を得ることも目的であり，ユーザが感覚の有無を比較的判断しやすいことから高所感を対象とした，という研究経緯がある．

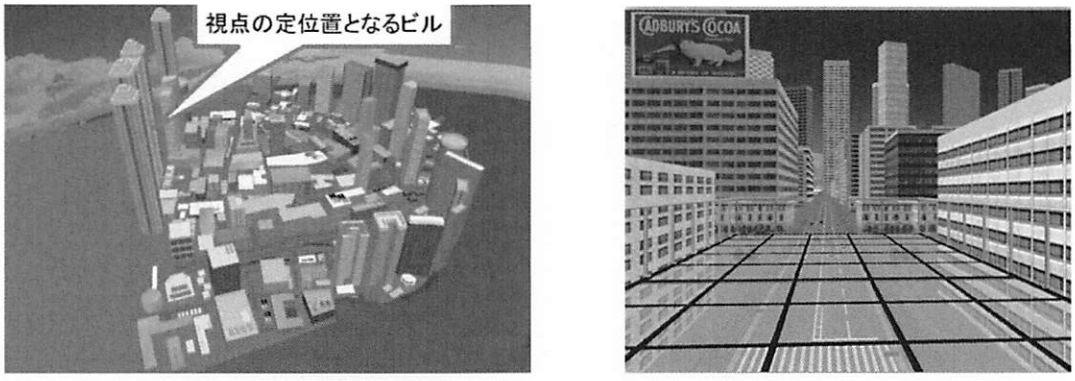
昨年度は高所感を体験するコンテンツとして，超高層ビル内をエレベータで上昇する際に，周辺の景色（ビル群）や足下が見えるものを作成した．そして，ビル周辺に並ぶ建物の CG モデルの表現方法を変えて，高所感への影響を調べた．実験結果からは下方に見える映像のリアリティは高所感に影響を与えることがわかった．しかし，映像条件数や被験者数が少なく，更なる実験が課題となった．

今年度は，高所感実験用コンテンツを新たに作成して，さらに高所感を感じやすいものとした．評価実験については，周辺ビル群の建物密集度（密度）と建物の平均高さを変えた場合の高所感の変化を調べた．また，没入型空間提示ディスプレイとして，4 面立体スクリーン型ディスプレイ（CAVE 型ディスプレイ）と広視野頭部搭載型ディスプレイ（広視野 HMD：Oculus VR 社の Oculus Rift 使用）を用いた実験を実施した．

(2) 高所表現コンテンツ

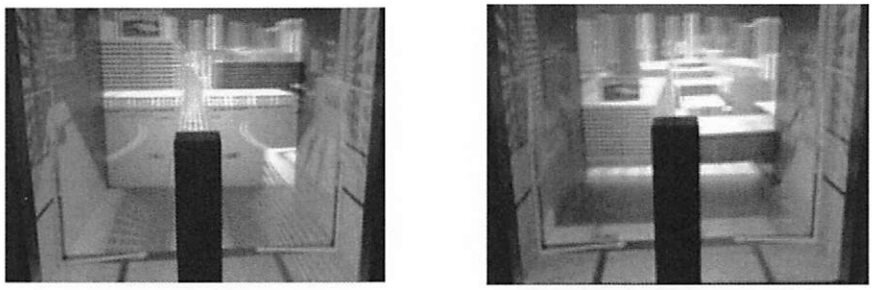
高所感の実験を行うための高所の仮想空間を 3DCG で制作して（図 1(a), (b)), CAVE 型ディスプレイ（以降, CAVE）と広視野 HMD（以降, HMD）で表示した. 制作した高所コンテンツは, ビルが建ち並ぶ町並を高層ビルから見下ろす体験ができるものである（図 2 (a), (b)). CAVE では床面スクリーンに眼下が表示されて, また HMD では頭部を下に向けることで眼下を見ることができる.

なお, 眼下や周辺映像の高所感への影響を調べるためのコンテンツとして, 周辺ビルの数を減らした「低密度」設定（図 2(c)）と, 周辺ビルの高さを低くした「低ビル」設定（図 2(d)）も制作した.

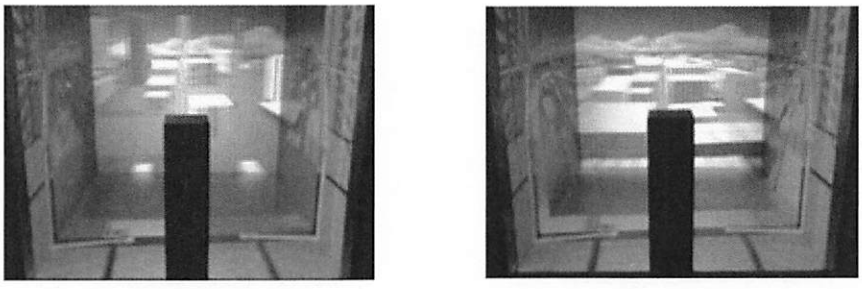


(a) モデルの全景　　(b) ビルから眼下を見下ろせるテラス

図 1. 高所感検討用 CG コンテンツ



(a) 高所コンテンツ(30m)　　(b) 高所コンテンツ(110m)



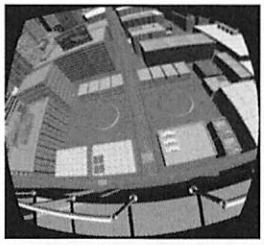
(c) 低密度設定(110m)　　(d) 低ビル設定(110m)

図 2 実験で用いた提示映像（CAVE で表示）

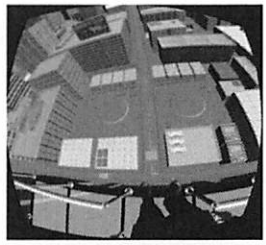
(3) 周辺モデル CG 表現等に対する高所感の実験

被験者に CAVE または HMD で高所コンテンツを鑑賞してもらい，その際の高さ感，怖さ感を評価アンケート（6 段階）で調べた．実施した実験を表 1 に示す．実験 1 では被験者が設定上の高さに対してどの程度の高所感や恐怖感を感じるのかを図 2(a)，(b)のコンテンツを使用し，調査を行った．実験 1 のアンケート結果から CAVE・HMD どちらのデバイスにおいても周辺環境によって高所感が得られることが分かった．そこで実験 2 では周辺環境に変化があった場合に高所感や恐怖感はどのように変化するのかを探るために「低密度」設定（図 2(c)）と，「低ビル」設定（図 2(d)）を用いて実験を行った．また，実験 3 では橋の縁へ移動するアニメーションにより高所感を感じたとのアンケート結果から，その提示方法を変えたコンテンツで実験した(図 3)．

項目	概要
実験 1	設定上の高さに対する高所感や恐怖感を調べる．高所コンテンツを使用．
実験 2	周辺映像が影響するかを調べる．低密度，低ビル設定のコンテンツを使用．
実験 3	HMD のみの実験で，HMD で仮想の脚部を提示して，その影響を調べる．



(a) 足非表示(110m)

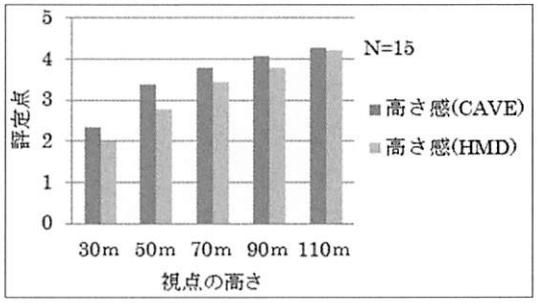


(b) 足表示(110m)

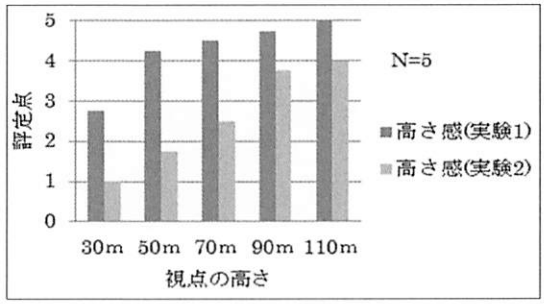
図 3　実験 3 で用いた提示映像（HMD で表

実験結果の一部を図 4 に示す．結果からは次のことがわかった．

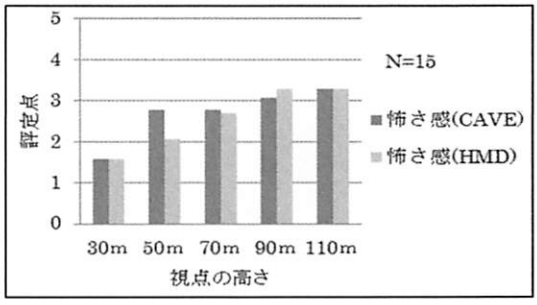
- CAVE の方が，視点が比較的低い段階から高所感を得やすいが，視点の高さに合わせて高所感が変化する HMD の方が高さ表現には有効である．
- 眼下の周辺モデルについては，密度は高所感に影響し，高さの違いはデバイス（CAVE か HMD）の違いによる影響がみられる．
- HMD にて，仮想の脚部を表示することで，臨場感を高まることを期待したが，高所感の評価結果からは効果・影響は認められなかった．



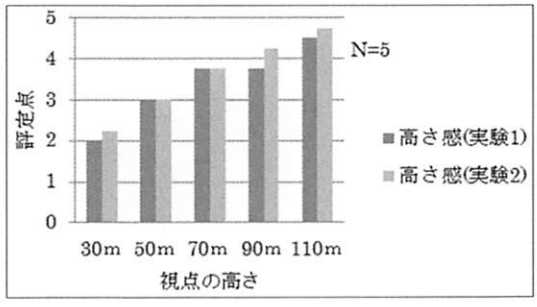
(a)　実験 1 の CAVE と HMD の高さ感比較



(c)　低密度の CAVE の高さ感比較



(b)　実験 1 の CAVE と HMD の怖さ感比



(d)　低ビルの HMD の高さ感比較

図 4　高所感に関する実験結果の一部（CG 上の設定高と被験者の高さ感覚評定点）

(4) まとめ

本研究は没入型空間呈示ディスプレイとして，CAVE 型ディスプレイと広視野 HMD を用いて，高所感を効果的に表現する映像条件を調べることと，その際のユーザの反応を調べることを目的とした実験を行った．

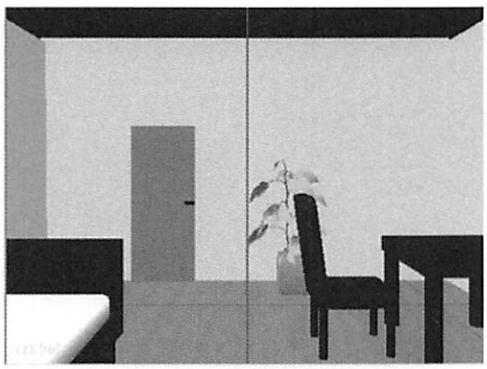
今後の課題として，身体反応による評価として，心拍数の変化，皮膚電位（GSR）変化，重心動揺などの計測を行い，他覚的かつ時系列的な評価が必要と考える．また，高所感に影響する要因として，今回の HMD を用いた実験（実験３）での仮想的な身体 CG モデル（身体イメージモデル）の活用に関する研究を進めていく予定である．

4.2 仮想空間を用いた室内での揺れ感覚に関する基礎研究

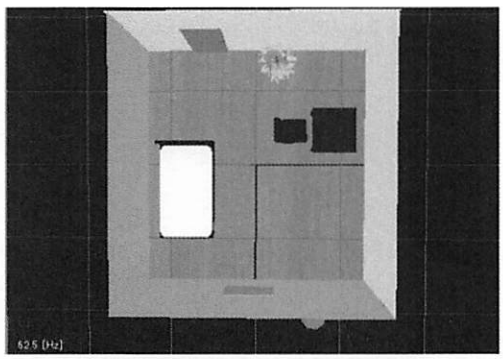
(1) はじめに

一般的に地震を体験できるシミュレータとして，起震車が挙げられる．これは，リアルな揺れを震度ごとに体験することができるメリットがあるが，今住んでいる家や部屋を再現し，シミュレーションを行おうとすると，コストや時間がかかる．その解決策として，本テーマでは地震の揺れを仮想空間で再現し，地震を比較的簡単に体験できるシミュレータを検討した．今年度は，その基礎的なものとして，映像だけで揺れを再現できるかについて調べた．

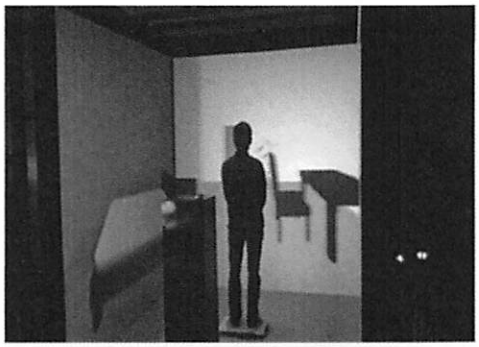
図 5 に制作した簡易体験シミュレータと CAVE 型ディスプレイでの実験風景を示す．



(a) 部屋の CG モデル（側面）



(b) 部屋の CG モデル（上面）



(c) CAVE での実験風景

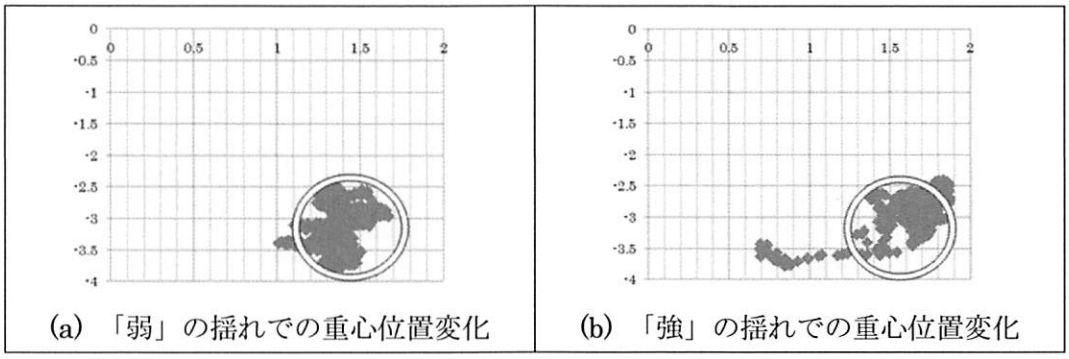
(d) CAVE での実験風景(家具なし)

図 5. 地震の揺れ簡易体験シミュレータと CAVE ディスプレイでの実験風景

(2)評価実験の概要と実験結果

制作したコンテンツで被験者は揺れを感じるか，また，その際に重心が変化するかを調査した．被験者には，CAVE 中央に置かれた重心計に乗り，映像を見て，部屋での揺れ，揺れの強度が「弱」と「強」を体験してもらい，最後に実験に関する印象をアンケートで回答してもらった．

アンケート結果としてコンテンツを体験し，全員が揺れたと認識していた．また，「弱」と「強」の揺れの違いにも被験者全員が違いを感じていた．揺れ映像鑑賞時の重心の変化の例を図 6 に示す．「弱」の揺れでは変化は見られなかったが，「強」の揺れでは重心の変化が見られた．



(a) 「弱」の揺れでの重心位置変化　(b) 「強」の揺れでの重心位置変化

図 6．地震の揺れ簡易体験シミュレータ体験時の被験者の重心位置変化の例

(3)おわりに

映像の動きで揺れの感覚を起こして，地震を比較的簡単に体験できる室内映像シミュレータを試作して，実際に動きを感じるかを実験した．実験結果からは実際に身体が揺れていなくても，映像で地震の揺れを認識させることができることが分かった．また，家具がある場合とない場合とでは，認識に違いがあり，特に「弱」の揺れで認識が変わることがわかった．

今後の課題として，オブジェクトの数を増やし，物が倒れる，割れるといったアクションをオブジェクト１つ１つに設定しアクションに合わせた音をつけるなど，地震体験シミュレーションとしての質を向上させることがあげられる．

4.3 ステレオ画像処理を用いた AR 画像内での対象選択インタフェース

(1) はじめに

本研究では今後発展が期待できると考えられる AR（拡張現実感）型ウェアラブルコンピューティングのための入力インタフェースの研究を行った．研究では，入力となる手指をビデオシースルー型 HMD（ヘッドマウントディスプレイ)に取付けた２眼カメラから得られた映像に対してステレオ画像処理を行い，HMD に表示される PC 画面を操作するもので，手指そのものが入力インタフェースとなることで従来のタッチパネルやマウスなどと比較してより直観的と考えられる操作方法としてインタフェースの提案を行った．

頭部搭載型ディスプレイ（HMD）は，ウェアラブルコンピュータの１つであり，頭部に装着するゴーグル型で大型スクリーンを体感できるディスプレイである．その特徴として，ユーザがどの方向を向いていても映像を見ることができ，頭部に装着するストレス以外にはハンドレスで負

担が少ないことなどが挙げられる．HMD にも種類がいくつかあり，今回用いたデバイスはビデオシースルー型の HMD である．ゴーグルの先にカメラが２つ搭載されていることで，目前の映像を取り込みそれに対して画像処理を行うことに長けている．また，２つのカメラを用いることでステレオマッチングを可能にし，3 次元情報を扱うことも可能である．図 8(a)は研究で用いた HMD である．

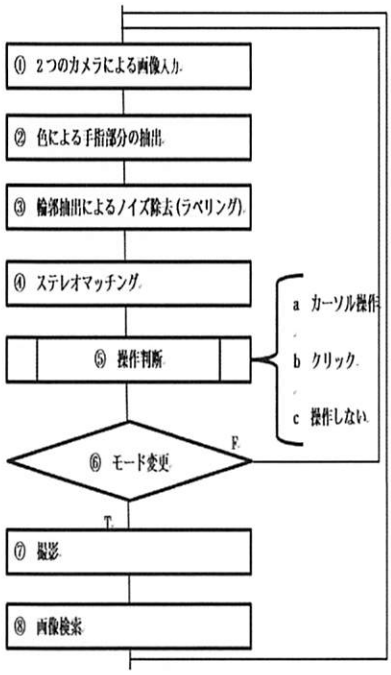


図 7．手指動き取得処理の流れ

(2)タブレット端末用プログラムの試作

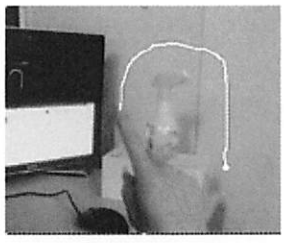
研究では，HMD に映し出される手指画像に対して画像処理ライブラリ OpenCV を用いて画像処理を行い，手指をマウスの代わりとして，カーソル操作・クリックを行えるシステム構築を目指した．更に，目前の物体などを指で範囲指定を行い，その動きを撮影して，処理で抽出した画像をインターネットで検索できる機能を付加した．図 7 が手指画像処理の大まかな流れである．図 8 に実行時の様子の例を示す．

(3)まとめ

本研究では，手指を入力インタフェースとし，カーソル操作・クリック及び画像撮影から画像検索を 10 秒～20 秒程で行えるシステムを構築した．今後の主な課題として，左右のカメラで発生する輝度値のズレと画像検索時の画像の問題の 2 点が残った．今後の発展として，5 本指を用いた操作や仮想キーボードの操作などが必要になると考えられる．

(a)ビデオシースルーHMD

(b)画像処理での手指抽出


(c) 手指で対象指定

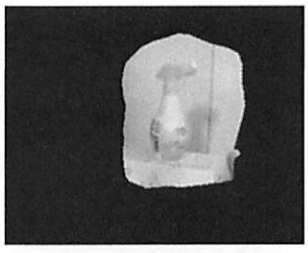

(d) 対象の抽出

図 8．触感タブレットによる食品画像表示プログラムの作成

5. 今後の計画

今後の計画として，研究テーマ毎に今年度の研究をさらに発展させることと，学習効果を評価する方法を検討することがあげられる．

具体的には，

- 高所感の研究では，高所感を高める要因として，ディスプレイ要因，モデル要因，テクスチャ要因，サウンド要因に分けて，さらなる検討を行う．
- HMD 使用時の仮想的な身体 CG モデル（身体イメージモデル）の活用に関する研究を進めていく．
- 今年度は，十分な成果の得られなかった感覚協調メディアによる学習・訓練コンテンツの研究を推進する．特に，VR コンテンツとしての食品画像表示では，食品・料理画像に適した表現の検討を行う．
- 各種の評価実験では，心拍数，GSR（皮膚電位反応），眼球運動，重心移動，身体動作などの生理・身体反応を計測して，学習効果との関連で検討を加える．

6. 研究成果の発表

今年度（平成 25 年度）は，研究成果の学外発表として，次の発表を行った．

【論文（査読有）】

① 井田博史，高橋まどか，緒方貴浩，福原和伸，石井源信，井上哲理："ヴァーチャル環境での片手捕球パフォーマンスに対する立体呈示の効果",スポーツ心理学研究，早期公開 No.2013-1201 (2014.01)

【国際学会（査読有）】

① Yuki Yamaguchi, Takahiro Hashiba, Tetsuri Inoue and Takashi Shibata : "Effect of foreground images on self-motion induced by CAVE-like display, " Proc. 5th Joint Virtual Reality Conference (JVRC 2013), pp.67-70 (2013.12)

② Takashi Shibata, JaeLin Lee, Tetsuri Inoue : " Ergonomic approaches to designing educational materials for immersive multi-projection system, " Proc. Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 9012 (2014.02)

（学会発表）

①画像電子学会第 41 回年次大会（平成 25 年 6 月 22-23 日・青森）

「没入型ディスプレイにおける高所表現と鑑賞者の反応」

（以上）

fNIRS を用いた味覚の客観的評価に関する基礎研究
-感覚間相互作用に着目して-

ロボット・メカトロニクス学科　高尾　秀伸

１．研究の目的

機能的近赤外分光法(fNIRS: functional Near-InfraRed Spectroscopy)を用いて主観評価中の前頭前野を測定することで,味の評価に関わる部位を特定し,味の嗜好評価の客観的評価の可能性を検討する．今期は飲料（味）の嗜好評価（美味しい/不味い）および音楽の嗜好評価（好き/嫌い）と大脳賦活特性との関係性を検討することで,味覚と聴覚との高次な感覚間相互作用に関連する脳部位を明らかにすることを目的とする．

２．研究の必要性及び従来の研究

高い人工現実感や心理的訴求性を提供するためには，五感に対して複合的に情報メディアを呈示することが効果的である．五感のうち，視覚をはじめとして，最近では聴覚，触覚の人工現実感に関する研究が進められているが，味覚メディアに関する研究は比較的進んでいない．その理由の一つとして，客観的に味覚を評価する方法はまだ開発されていないことが挙げられる．従来，味の評価手法として官能評価が主として用いられてきたが，これは主観的な評価方法であった．そこで，味覚メディアを評価するうえで，より客観的な評価指標の確立が求められている．

３．期待される効果

マルチメディアコンテンツを開発するうえで，五感のひとつである味覚の情報メディアを効果的に複合することで，より高い人工現実感や心理的訴求性を提供することが可能となる．その際，より客観的，科学的観点から設計，評価を行うことができる．

４．研究の経過及び結果

4.１ 脳血流測定

（1）近赤外光イメージング装置

脳の活動を計測する手段として，近赤外光イメージング装置(島津製作所，FOIRE-3000)を使用した.この装置は近赤外分光法(NIRS:Near-InfraRed Spectroscopy)を用いている．近赤外光は頭皮，頭蓋骨を透過しやすく，ヘモグロビンの酸化状態により近赤外光の吸収量が異なる特性がある.本装置は近赤外光を用いて脳血管内の酸化ヘモグロビン(oxyHb)濃度と脱酸化ヘモグロビン濃度を測定し，脳賦活を計測することができる.

（2）測定部位

本実験では,味覚における快･不快の判断を測定する為,前頭連合野を測定する.測定基準として,国際10-20法に基づき,受光ファイバ9(青の9)をFpzに設定した.領域は33のファイバで(縦3×横11)で，52chに構成した

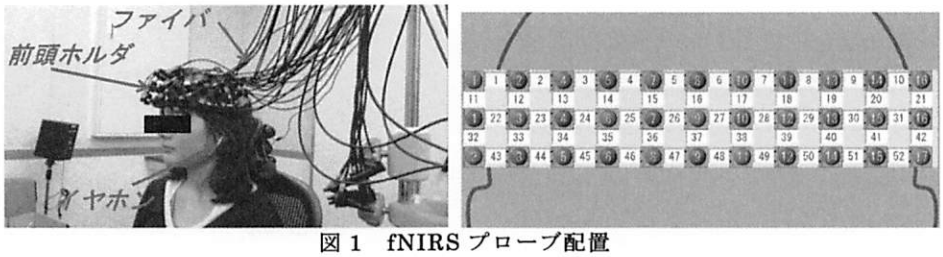


図 1　fNIRS プローブ配置

（3） 実験手順

室温・湿度は一定で行い，被験者は，心身ともに健康な大学生 5 名（男性 3 名，女性 2 名，平均年齢 20.4±1.6 歳，右利き）で行った．実験中は閉眼で身動きを控えてもらった．

測定項目は 1）酸化ヘモグロビンの濃度の変化量，2）7 件法の味の嗜好評価，3）7 件法の味と音楽のマッチング評価，

4）音楽の嗜好順位である．実験条件として，音楽のみの条件（以下音楽のみ）と飲料のみの条件（以下飲料のみ）並びに飲料と音楽を生み合わせた条件（以下音楽+飲料）とした．音楽は 5 種類用意し，1）無音，2）静かな午後，3）明るい音楽（Erik Satie の Je te veux），4）暗い音楽（Gnossienne No. 3）並びに，5）ホワイトノイズとし，飲料は 4 種類用意し，1）オレンジジュース，2）軟水，3）ブラックコーヒーと青汁を混ぜたもの（以下，不快飲料）並びに，4）被験者が一番美味しいと思う飲み物（以下，美味しい飲料）とした．実験者は被験者に各刺激嚥下後一定時間の後，−3〜+3 の 7 件法で味の嗜好評価及び味と音楽のマッチングをアンケートとして答えてもらい，軟水で口内のリフレッシュを行ってもらった．図 2 に飲料のみ及び飲料+音楽の実験タスクを示す．

安静条件	課題前レスト	飲料摂取	味嗜好及びマッチング	アンケート・休憩口内リフレッシュ
	20sec		20sec	

図 2　飲料のみ及び飲料+音楽の実験タスク

上記測定ののち，被験者の負担に応じた休憩を挟み，音楽のみを聴いてもらい評価と順位付けを行わせた．

図 3 に音楽の実験タスクを示す．

安静条件	レスト	タスク	休憩
	20sec	40sec	

図 3　音楽のみ実験タスク

本研究は，神奈川工科大学・ヒトを対象とした研究に関する倫理審査委員会の承認（第 2013-016 号）を受け，倫理指針を遵守して実施された．

4.2　実験結果

得られた測定結果の正規化を行うために課題前レストをベースラインとした標準得点を算出し，その平均値を代表値とした．得られた代表値と味の嗜好評価，音楽の嗜好順位並びに，味と音楽のマッチング得点との相関比の検定を行った．

1）全音響のみから無音を抜いた音響のみにおいて ch14 及び ch30 においてやや弱い関連があり，さらに音響のみからホワイトノイズ条件を抜いた音楽のみでは ch12，ch14 並びに，ch30 においてやや弱い関連が見られた．これより，ch12 は音楽を聴いたときのみ関連が示唆された．また，ch14，ch30 付近は音楽を注意して聞いた時に賦活する部位であるといわれていることから，

今回の音楽の順位を考えるために注意して聞いた結果であると考えられる.

2)無音条件時の味嗜好の評価の実験より, ch4, ch8,
ch23, ch26, ch33, ch34, ch43, 並びに ch44 にやや弱い関連が見られた. 飲料のみの味嗜好の評価の実験より, 先行研究より, 食べ物の評価をする際に dlPFC(背外側前頭前野)及び vmPFC(腹内側前頭前野)が関連していると言われている[2]. このことから, 味の嗜好評価による dlPFC 並びに vmPFC の賦活の可能性が考えられる.

3)味と音楽のマッチングの結果より, ch2, ch9, ch13,
ch19, ch20, ch29, 並びに ch33 に弱い関連が見られた (図 4). 音楽と味のマッチング得点の相関比の結果から, 味の嗜好評価でも関連が見られた ch33 においては条件に関わらず味の嗜好評価に関連する部位である可能性が考えられる. またそのほかのチャンネルにおいては, 複数感覚を同時処理させるために、ワーキングメモリの使用が増加した可能性が考えられる. 具体的には, 音楽と味を記憶しマッチングするという総合評価を行うため, ワーキングメモリにおける高次な認知情報処理により右の dlPFC 以外に左の dlPFC にも賦活が見られたのではないかと考えられる.

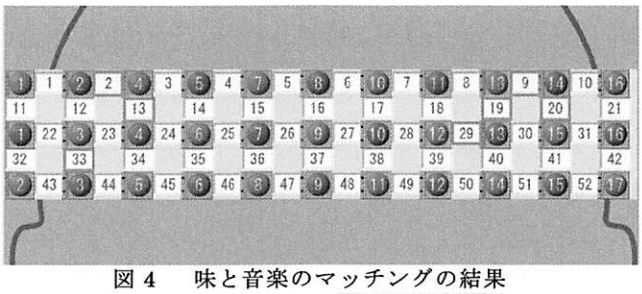


図 4　味と音楽のマッチングの結果

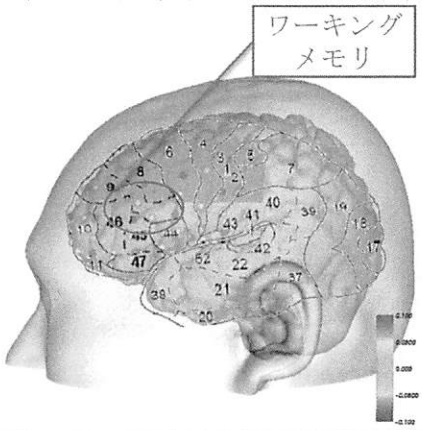


図 5　ワーキングメモリ領域における賦活

5. 今後の計画

今後の課題として, 被験者が少数だったため, 被験者を増加する事, 賦活機序の特定並びに, 多様な刺激呈示時の反応について検討が必要であると考えている.

6. 研究成果の発表

第 22 回日本人間工学会システム大会で発表された. 今後も対外的に発表を行う予定である.

以上

超音波センサとスマートフォン内蔵センサを用いた屋内測位基盤の構成法とその実証

情報工学科　　田中　博

１．研究の目的

位置情報はナビゲーション、情報提供や物流管理などに利用され、極めて有用な情報である。屋外での位置情報取得手段としては GPS がすでに広く普及し、事実上の標準システムとなっている。しかし、屋内エリアでの位置情報取得のための測位方法は、一般に屋外よりも高精度な位置検出が要求されるものの、GPS のように一般的な方法としては確立していない。

我々はこの問題点の解決手法の一つとして、広域な屋内エリアに適用可能な経済的、かつユーザ要求（精度、エリア等）に柔軟に対応可能な測位方法の検討を進めている。具体的には電波を用いる方法に比べて高精度な測位が可能な超音波センサを用いるとともに、経済的な測位を実現するために慣性センサと組み合わせた方法である。特に、近年の普及が著しいスマートフォンに実装されている慣性センサの利用を前提にする。

また、明らかにした要素技術を広域屋内測位プラットフォームとしての汎用化を実現し、多様な応用システムへの展開を容易とすることをポイントとする。さらに、具体的事例として、実用的なアプリケーションシステムを構築、デモすることを目標にしている。

２．研究の必要性及び従来の研究

屋内での位置検出については、大規模な地下街やアーケード内でのナビゲーション、視覚障碍者のためのガイダンス、工場内での搬送車両の位置管理や自動運転など多くの適用領域が考えられるが、実際にそれらの要求に答えることができる汎用的なシステムは実用化されていない。

前述に示したように屋内での測位法として確立されたものはなく、(1)無線 LAN などの電波強度や到達時間差を用いたもの、(2)RFID を床等に配置し、その受信から位置を割り出す方法などが多く検討されている。しかし、(1)では精度的には数 m の誤差が生じること、(2)では広いエリアでの測位を実現しようとすると RFID を稠密に配置するために膨大な数量の RFID が必要となり、現実的なシステムとはならない。一方、デッドレコニングと呼ばれる慣性センサを用いた測位も多く提案されているが、その蓄積誤差を補償する方法も提案されているが、精度に課題が残る。我々の提案手法と同じ原理である超音波を用いた測位法の研究例があるが、これらは狭い空間や室内での位置を正確に測るという観点で検討されており、モーションキャプチャとしての利用や比較的狭い室内での人の位置や動線の把握などへの適用に留まっている。また、屋内での位置情報として重要となる在階推定は、天候変化による気圧変動のために、長時間にわたる推定は現状技術では困難である。

我々の研究は従来の研究とは異なり、超音波を用いた測位法を広域エリアへの測位シス

テムと展開するための要素技術とアーキテクチャを明確にするとともに実際に試作を行い、屋内測位基盤として実現する。特に、スマートフォンに内蔵されている慣性センサ、気圧センサに着目してその内蔵センサと併用した屋内測位で重要な位置を占める在階推定を含めた測位システムを実現し、センサの設置数の削減による低コスト化や精度、エリアのユーザ要求に柔軟に対応するものである。

３．期待される効果

現在のシステムにない屋内での広域エリアに適用可能な高精度な測位システムを提供できる。そして、屋内版 GPS として、多くのアプリケーションを展開できる基盤技術、プラットフォームと成り得る。合わせて、要素技術の研究開発に留まらず、汎用プラットフォームとしてその上に応用システムを構築し、実証システムとして実現することも研究課題として含めている。したがって、単なる学術的な成果という観点ではなく、産学共同研究や事業への展開の可能性も期待できる。

４．研究の経過及び結果

平成 25 年度は、前年度に試作納入したシステムの機能検証と評価、および適用領域拡大のための新たな方式の検討と試作、その他を行い、以下の進捗を得た。

(1)分散配置型超音波測位試作システムの評価

広域エリアに展開可能な分散配置が容易なユニット化構成によって試作した受信機とセンサを廊下天井に設置し、18m の区間に渡る測位領域を確保した。そして、実験によって、構成の妥当性とともに精度評価を行い、3cm 以下の測位精度（平面内）を確保できることを確認した。また、センサ数低減が可能な二次元測位の精度も確認した。

(2)超音波測位と慣性測位の融合（センサフュージョン）によるプラットフォーム化

誤差蓄積が問題となるスマートフォン内蔵の慣性センサによる慣性測位結果を超音波測位システムの結果を用いて、誤差補正するシーケンスを検討した。データベース設計を行うとともにシステム実装し、実験的にその効果を検証した。測位結果を地図上に表示し、スマートフォンの画面でモニタする仕組みを構築したが、応答性が問題となることが明らかになり、翌年度以降の課題として残った。

(3)在階推定技術の提案と実験評価

屋内位置情報として重要な要素である在階情報を得るための手法を提案、権利出願した。スマートフォン内蔵の気圧センサと、参照センサとする同一ビル内に固定設置した気圧センサの出力差から在階推定する新たな手法である。実験によりその手法の妥当性を確認した。

(4)測位情報の電動車いすの自動走行への応用

車両の自動走行に関する検討が活発化している。その屋内版として、高齢化社会や大型屋内施設の増加を念頭に、電動車いすの自動走行の検討に着手した。車いす内蔵のセンサによる位置推定と超音波測位システムによる推定位置補正を組み合わせた自動走行を確認した。より精度の高い走行、フロアー間移動を含めた目的地への自動走行が当面の目的である。

(5)スマートフォンからの発生音波の利用の可能性の評価

超音波測位システムは、専用の超音波送信機を所有する必要がある。音源として、既に広く普及しているスマートフォンを利用できれば、利用の障壁は大きく軽減されると考えられる。スマートフォンのスピーカから発生できる非可聴音を用いた測位システムの実現をめざし、環境雑音を除去するフィルタを含めた非可聴音受信機を設計、試作し、H26年度のスマートフォンを音源とする測位技術の検討につなげた。

５．今後の計画

H26年度は以下の4項目に注力して検討を進める。

(1)スマートフォンを音源とした測位システムの構成と評価

昨年度試作した受信機を用いて、まずは実現可能性を確認するとともに、非可聴音を用いることの問題点を明らかにする。そして、その問題点の解決を図る。現在回路で実現している機能のソフトェア処理への移行をめざし、使用マイコンの変更、プログラム開発を行う。さらに、高精度測位という観点とともに、測位システムの多数のユーザの収容という観点からの方法の検討を行う。

(2)慣性測位法のメガネ型端末への展開

これまでに得た慣性測位に関する技術、知見のメガネ型端末への適用を検討する。地図情報を見ながらの“歩きスマホ”は、問題であり、これを解決するための一つの提案技術になる可能性がある。具体的には、これまでに、腰、腕に装着、ポケットに入れていた構成から頭部装着時のセンサ波形を用いた推定手法を見直す。実験的に検討と検証・評価を行っていく。

(3)測位プラットフォームの構成

前年度に課題となった地図情報と測位情報をユーザに提示する際の遅延時間を低減するためのシーケンス、構成について検討し、プラットフォームとして構成する。そして、歩行者、電動車いすの位置情報表示、ナビゲーションに有効なプラットフォームであることを実証する。

(4)電動車いすによる測位応用システムの構築と実証

これまでに検討してきた在階推定、昇降判定技術、マップマッピング技術、経路探索技術の検討を深化させ、フロアー間移動を含めた電動車いすの自動走行制御に適用するための技術として最適化を図る。最終的には、目的地設定のみで、自動的にその場所に車いすが走行することを実演する。

(5)外部発信

学会発表に加え、CEATEC などへの出展を計画する。

６．研究成果の発表

上記遂行にあたって、H25 年度に発表したものを以下に示すとともにその別刷りの一部を添付する。

(1) 屋良 朝克, 秋山 征己, 鷹野 孝典, 五百蔵 重典, 田中 博, ”超音波測位と慣性測位による広域屋内測位のための地図情報提示システムの設計と構築,” DICOMO2013, 3E-6, pp. 736-741, 2013.

(2) 田中 博, 屋良 朝克, 秋山 征己, 五百蔵 重典, ”位置情報基盤としての屋内測位技術－超音波測位と慣性測位の融合の提案－,” 平成 25 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, TC3-6, pp. 179-184, 2013.

(3) 菅谷 隆浩, 板垣 泰弘, 西村 広光, 田中 博,” クラスタリングを用いた色検出閾値決定とその評価,” HCG シンポジウム 2013, HCG2012-C-1-1, pp. 43-48, 2013.

(4) 屋良 朝克, 法月 佑太, 五百蔵 重典, 田中 博, “スマートフォン端末を利用したデッドレコニングにおける蓄積誤差補正手法の検討と評価,” HCG シンポジウム 2013, HCG2013-B-5-1, pp. 276-281, 2013.

(5) C. Yara, M. Akiyama, S. Ioroi, H. Tanaka, “Indoor Positioning System using Ultrasonic Sensors as a Position Information Infrastructure for a Wide Area,” Asian Conference on Information System 2013 (ACIS2013), pp. 386-389, 2013.

(6) 富上 徹也, 布施 諒, 五百蔵 重典, 田中 博, 山本 富士男, “気圧情報を利用した在階推定方法の提案と評価実験,” 第 56 回情処 ITS 研究会, 2014-ITS-56(16), pp. 1-5, 2014.

(7) 法月 佑太, 屋良 朝克, 五百蔵 重典, 田中 博,“電動車いすの屋内での高精度な自動走行に関する基本実験,” 2014 信学総大, A-19-16, p. 256, 2014.

(8) 村田 翔太郎, 布施 諒, 屋良 朝克, 五百蔵 重典, 田中 博,“スマートフォンの非可聴音を用いた屋内測位のための基本実験,” 2014 信学総大, B-18-59, p. 627, 2014.

(9) T. Sugaya, T. Suzuki, H. Nishimura, H. Tanaka, “29. Basic Investigation into Hand Shape Recognition Using Colored Gloves Taking Account of the Peripheral

Environment," Human-Computer Interaction International 2013, Lecture Notes in Computer Science Vol.8016, pp.133-142, 2013.

なお、本研究に対する一部の実験時の動画は
http://www.tnklab.ic.kanagawa-it.ac.jp/tanakalab/kenkyu.htm から視聴可能である。

基盤システム「RT2MOCAP」を用いたモーションメディアシステムの応用
～お天気インタラクティブシステムの開発～

情報メディア学科　小島一成

1. 研究の目的

筆者は，多地点の遠隔地にあるリアルタイムモーションキャプチャシステムを独自に開発したリアルタイム伝送技術で接続し，リアルタイムレンダリング技術で統合した３次元グラフィックエンジンを用いたモーションメディアシステムを構築している．この基盤システムを「RT2MOCAP」と称している．本研究では，基盤システム「RT2MOCAP」を用いたモーションメディアシステムの応用を目的としている．

2. 研究の必要性及び従来の研究

近年，光学式モーションキャプチャシステムは，1000 万画素以上の撮像素子の進歩によって精度の高い身体動作計測が可能となり，屋外撮影にも対応している．これによって，撮影対象の幅は広がりパフォーマンスキャプチャが主流である．しかし，計測エリアと様々なデバイス対応で解決しなければいけない課題を持っている．第１の課題として，計測エリアである．カメラの高解像度によって計測エリアは拡大している．また，欧米のモーションキャプチャスタジオがアジアに新しく拠点を持ち，遠隔地に計測エリアを持っている．第２の課題として，様々なデバイス対応である．入力デバイスは，生体計測機器，ビデオ映像，音声，センサである．出力デバイスは，PC やヘッドマウントディスプレイ，タブレット端末，CAVE,バーチャルセットなどである．このように様々な用途によってコンピュータ処理は，複雑化している．コンピュータ処理能力の解決手段として，並列分散処理が挙げられる．産業インフラの解決手段として，ネットワーク伝送システムが挙げられる．これらを統合した革新的な技術開発が急務となっている．そこで，筆者は，マルチメディアにモーションメディア【ジェスチャや身体動作】を加えた広義のメディアを３つの技術によるシステムを構築することで解決が可能であると考えた．その３つの技術は，リアルタイムモーションキャプチャ技術，リアルタイムネットワーク伝送技術，リアルタイムレンダリング技術である．この３つの技術で，筆者は，基盤システム「RT2MOCAP」を構築した．この基盤システム「RT2MOCAP」は，ジェスチャや身体全体の動きのモーションメディアをマルチメディアに加えたメディアシステムである．本基盤システムは，教育，放送，イベント，拡張現実感，仮想現実，プリビズ，デジタルサイネージ，リハビリテーション，スポーツ科学の分野に応用が可能である．

3. 期待される効果

本システムは，教育，放送，イベント，拡張現実感，仮想現実，プリビズ，ゲーム，メディア・アート，デジタルサイネージ，リハビリテーション，スポーツ科学等の幅広い分野に応用可能である．ゲームおよびメディア・アート分野において，マイクロソフト社が開発販売しているキネクトを代表する身体の動きを取り入れて，新しいインタラクティブなコンテンツが増加している．通常のユーザ・インタフェースでなく身体を動かすことでゲームおよびメディア・アートもアトラクションとしてユーザは，楽しんで Play することが可能である．そこで，筆者は本研究の基盤システムを基底とするリアルタイム MOCAP を用いたお天気インタラクティブシステムを構築することで，よりインタラクティブ性を兼ね備えたアトラクションコンテンツが向上すると考えている．

4. 研究の経過及び結果

本報告では，身体動作を用いたお天気インタラクティブシステムを構築する．本システムは，本研究室のお天気インタラクティブ・アートと RT2MOCAP を組み合わせることで，プレイヤーの身体動作をキャラクターに反映する．これまでのお天気インタラクティブ・アートは，キャラクターの動作にコントローラを用いていた．本システムは，キャラクターとプレイヤー間でのインタラクティブ性を向上するため，キャラクターの操作に身体動作

を用いる．身体動作の取得は，モーションキャプチャシステムを用いる．プレイヤーは，様々な天候に応じて，キャラクターを操作する．本システムは，モーションキャプチャシステム，RT2MOCAP，お天気インタラクティブアプリケーションで構成する．モーションキャプチャシステムを用いて取得した身体動作は，RT2MOCAP を用いて，グラフィックエンジンに伝送する．グラフィックエンジンは，Unity3D を用いる．Unity3D は，RT2MOCAP でクライアントとして用いているグラフィックエンジンである．Unity3D の機能は，物理演算やマルチプラットフォーム対応などがある．お天気インタラクティブアプリケーションは，Unity3D で構築する．お天気インタラクティブアプリケーションは，キャラクター管理部と天候管理部に分かれる．図1にお天気インタラクティブシステムの概要図を示す．

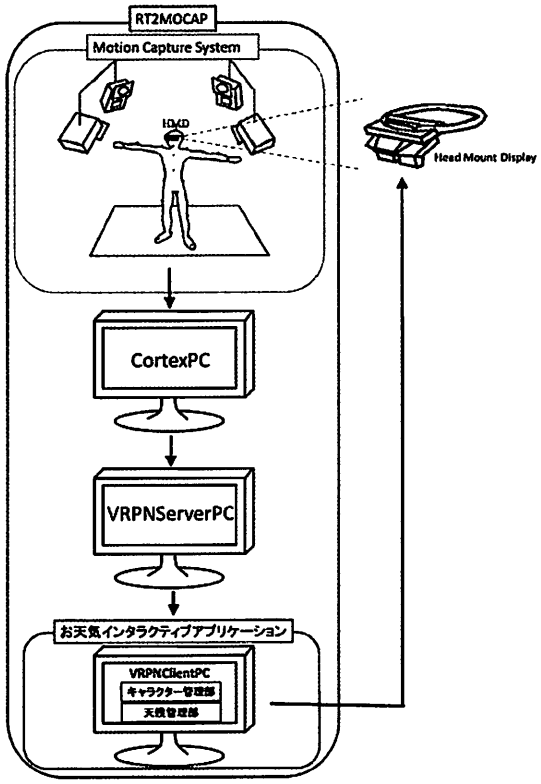


図1 お天気インタラクティブシステムの概要図

本アプリケーションは，キャラクター管理部と天候管理部で構成されている．キャラクター管理部は，キャラクターの動作処理と接触処理をする．キャラクターの動作処理は，RT2MOCAP で伝送された身体動作をキャラクターに反映する．キャラクターの接触処理は，キャラクターが，雨や雷などに接触した場合に，接触したオブジェクトに対応した処理を実行する．天候管理部は，天候の変更処理とキャラクター以外のオブジェクト同士の接触処理を実行する，天候の変更処理は，用意された天候を任意のキー入力により，実行する．接触処理は，背景や雨，雷のオブジェクトが，キャラクター以外のオブジェクトに接触した場合に処理を実行する．

本アプリケーションの被験者は，キャラクターを操作するプレイヤーと天候を変更する管理者がいる．プレイヤーは，HMD を装着し，モーションキャプチャシステムの計測範囲で動作する．プレイヤーの身体動作は，キャラクター管理部でキャラクターに反映され，ステージ内を移動する．ステージは，天候管理部によって，天候が設定されている．管理者は，キーボードで任意のキーを入力し，天候を変更する．天候は，晴れ，曇り，雨，雷の4種類がある．キャラクターは，雷に接触すると色が変化する．本アプリケーションは，キャラクターが，

雷に既定の回数以上接触すると終了する．終了画面は，リスタート，開始画面へ戻る，アプリケーションを終了の機能がある．図2にお天気インタラクティブアプリケーションの流れを示す．

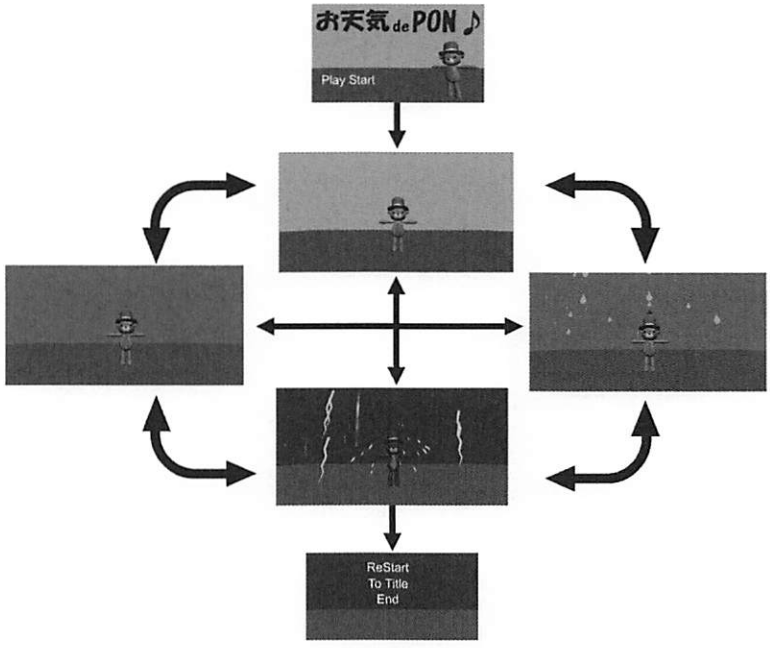
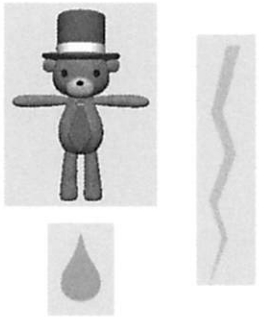


図 2 お天気インタラクティブアプリケーションの流れ

本アプリケーションで用いるオブジェクトは，キャラクター，雨粒，雷の3種類である．各オブジェクトは，種類を判別するためにタグを設定する．キャラクターは，プレイヤーが操作するキャラクターである．キャラクターの当たり判定は，帽子をカプセル型の当たり判定で囲むように設定する．キャラクターが，雷に接触すると，色が変化し，雷を削除する．雨粒は，キャラクターに接触した際に不自然な接触をしないように雨粒よりも小さめに当たり判定を設定する．雨粒が，キャラクターに接触すると，水しぶきのエフェクトと接触音を再生する．雨粒は，他の雨粒または，地面に接触することで消滅する．雷は，全体を長方形で囲むように当たり判定を設定する．雷が，キャラクターまたは，地面に接触すると，エフェクトと接触音を再生する．雷は，地面に接触すると一定時間地面に直立し，消滅する．図3に本アプリケーションで用いるオブジェクトを示す．



・キャラクター タグ：Pleyer
プレイヤーが操作するキャラクター．
帽子を囲むように当たり判定を設定．
雷に接触すると色が変化し，雷を削除．

・雨粒 タグ：Rain
雨粒より小さめに当たり判定を設定．
キャラクターに接触すると，エフェクトと接触音を再生．
地面に接触すると，エフェクトを再生し，消滅．
他の雨粒に接触すると，消滅．

・雷 タグ：Thunder
雷を囲むように当たり判定を設定．
プレイヤーに接触すると，エフェクトと接触音を再生．
地面に接触すると，エフェクトと接触音を再生し，時間をおいて消滅．

図 3 本アプリケーションで用いるオブジェクト

本研究では，RT2MOCAP を用いたお天気インタラクティブシステムを構築した．RT2MOCA を用いて被験者の身体動作と座標位置を取得し，実際空間の動作を仮想空間に反映させることで，インタラクティヴィティの増したお天気インタラクティブシステムを実装した．インタラクティブシステムは，科学技術を用いて観客の身体動作を作品の芸術表現に取り入れ，作品の映像や音声を変化させる芸術作品で，2006 年にお天気インタラクティブ・アートを本研究のシステムに改良した．本システムのお天気インタラクティブシステムは，相互作用を利用し，被験者のアクションをキャラクターに反映させることにより，リアルタイムにキャラクターを操作することが可能である．本研究室で開発した基盤システムの RT2MOCAP により，身体動作を取り入れたアトラクションコンテンツの開発が容易になり，今後，様々なアトラクションコンテンツを開発していく次第である．

5. 今後の計画

今後の計画は，基盤システム「RT2MOCAP」の拡張を主として開発を実施し，放送，イベント，拡張現実感，仮想現実，プリビズ，ゲーム，メディア・アート，デジタルサイネージ，リハビリテーション，スポーツ科学等の幅広い分野に応用を検討していく次第である．

6. 研究成果の発表

＜口頭発表＞

1. 小島一成：“Multi-site Linked Motion Capture System”，50 周年国際シンポジウム，2013

リハビリテーション指導支援のための体操インストラクタ・ロボット・システムの開発

ロボット・メカトロニクス学科 吉野 和芳

1．研究目的

身体能力改善や維持のためのリハビリテーションや体操を効果的に実施させるためには，一方的に動作方法を指示するだけでなく，利用者が実施した動作に対してフィードバックすることが重要であるという観点から，リハビリテーションや体操を指導するインストラクタ・システムの構築を目的とし，今年度は，特に，リハビリテーションを実施する患者の症状や体の柔軟性の違いなど利用者の身体的特性に影響しない動作評価方法の確立を目指す．

2．研究の必要性及び従来の研究

動作を教示するシステムとして，民族舞踊の学習支援などを目的とし，ロボットやコンピュータグラフィックス（CG）を利用して学習者へ提示するシステムなどの研究が進められているが，これらのシステムでは学習者がシステムから一方的に指示された動作を模倣するだけであり，その模倣した動作が正しいか否かについては学習者自身が判断するしかない．これに対して本システムは，動作を指示するだけでなく，利用者の動作を評価し，その結果を利用者にフィードバックすることで正しく動作させるよう指導するものである．

利用者の動作にフィードバックするシステムとして MIT の Davis らの Virtual Personal Aerobics Trainer がある．このシステムは，エアロビクスをビデオ映像で指示し，その指示に従っているかを評価することによって，"Good job!"や"Get moving!"というようなコメントを利用者に伝えるものである．しかし，このシステムにおける利用者の動作評価は，正誤だけである．これに対し，本システムは，動作の正誤だけではなく，動作が誤っている場合には正しく修正する方法をアドバイスすることによって，リハビリテーション実施効果の向上を狙ったものである．

3．期待される効果

体操インストラクタ・ロボット・システムを利用することによって，適切にリハビリテーションを実施させることができ，身体機能を維持し，生活の質を向上させることに貢献できる．また，高齢化によって病院や施設などで不足しているリハビリテーション指導者を支援することも可能である．さらに，動作推定に利用しているステレオカメラの撮影速度が将来的に向上することによって，速い動作を推定させることができ，スポーツ分野でのインストラクタやアミューズメント分野での振り付けやダンスの指導などへのロボットの利用も考えられる．

4．研究の経過及び結果

インストラクタ・システムを用いてリハビリテーションやストレッチ体操，速い動きのない体操（ラジオ体操など）の指導するための基礎技術の確立を目的とし，本年度は，リハビリテーションを実施する患者の症状や体の柔軟性の違いなど利用者の身体的特性に影響しない動作評価方法について検討した．

本研究では，リハビリテーション実施中における動作速度のゆらぎを吸収して評価するため，図 1 の

ように，リハビリ実施者の周りの３次元空間にステレオカメラの光軸に対してｘ，ｙ，ｚ方向にそれぞれ範囲を定めて設定した複数の直方体の区分領域で構成した姿勢判定領域を利用し，インストラクタ・ロボットが指示したリハビリ動作時に身体部位があるべき区分領域の位置と実際にリハビリ実施者の身体部位があった区分領域の位置とを比較して，動作評価やアドバイスを行ってきた．このとき，システム内におけるリハビリ動作時に身体部位があるべき区分領域の位置は，健常な大学生に動作をさせ，それらの平均から求めたものである．そのため．リハビリ実施者の身体特性，例えば，疾患による関節可動域の制限や図２のような体の柔軟性などの影響で，リハビリ実施者の身体特性上は正しく動作しているにもかかわらず，システム内で指定している区分領域に達していないことから，間違った動作と評価され，何度もアドバイスを受けるという問題が起こっていた．

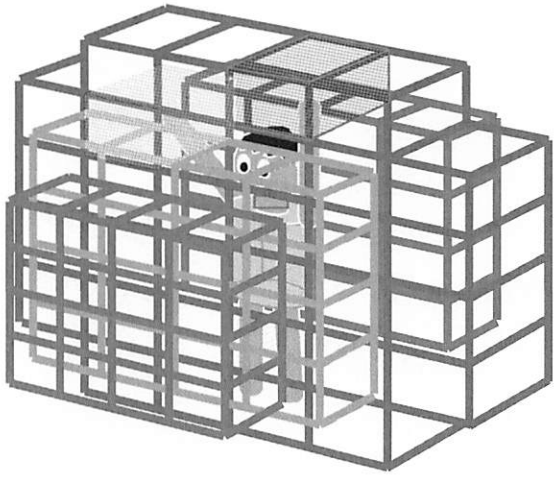
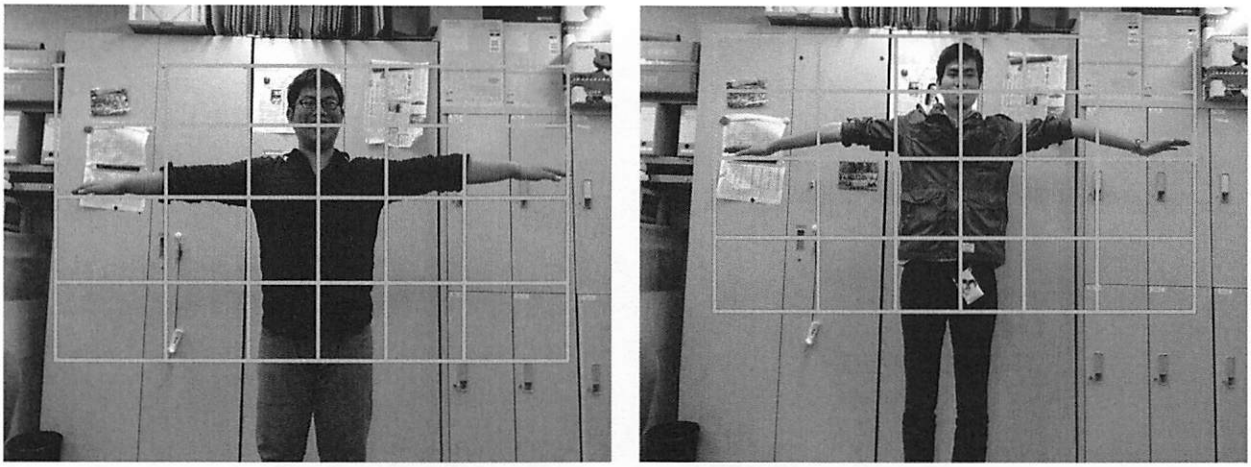


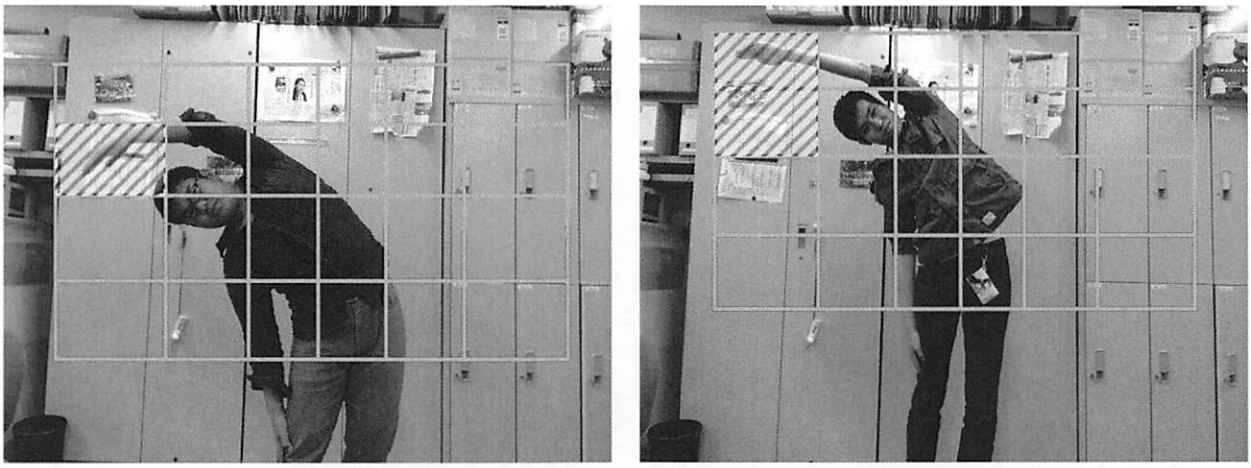
図１ 姿勢評価のための姿勢判定領域の例

図２ 体の柔軟性の違いによる「体を右に曲げる運動（左側部のストレッチ）」の様子

そこで，利用者の症状や体の柔軟性などを考慮し，それらに合わせてリハビリ動作を評価，アドバイスするように体操インストラクタ・ロボット・システムの改善を行なうため，利用者ごとに身体特性を記述したカルテファイルを保持・管理し，そのカルテファイルに合わせて姿勢判定のために利用している姿勢判定領域内における区分領域の評価位置（リハビリ動作時に身体部位があるべき区分領域の位置）を変更してリハビリ動作を評価，アドバイスすることを行なった．



(a) スタンダードポーズ



(b) 体を右に曲げる運動

図 3 姿勢判定領域（一部）における評価対象区分領域

図 3 に 2 人の利用者とそのときの姿勢判定領域（一部）の関係を示す．図 3(a)は，利用者の体格に合わせて姿勢判定領域をフィッティングさせたときの利用者との関係で，(b)は体を右に曲げる運動を実施したときの利用者と姿勢判定領域の関係を示している．また，図 3(b)の図中における赤線の斜線部で示している区分領域は，体を右に曲げる運動の評価に利用している区分領域を表している．

図 3(b)における左側の利用者においては，システムは，体を右に曲げる運動は正しくできていると評価する．一方，右側の利用者では，システムは，間違った動作であると判定し，「もう少し右に体を曲げてください」とアドバイスするようになっている．しかし，右側の利用者は，体が硬く，これ以上右に曲げることはできないため，システム側からアドバイスを受けても，修正できない状態である．このような場合でも，従来のシステムでは，アドバイスをし続けるというものであった．

そこで，一定回数アドバイスをしても改善されない場合は，システムは，利用者の身体特性上の問題であると判断し，そのリハビリ動作における評価対象の区分領域の位置（リハビリ動作時に身体部位があるべき区分領域の位置）を自動的に更新し，その利用者におけるリハビリ動作と評価対象区分領域の位置とをカルテファイルとして記録することとした．例えば，図 3(b)における右側の利用者の場合は，図中の緑色の斜線部が体を右に曲げる運動の評価位置として記録されることになる．次回以降のリハビ

リ運動実施時には，この利用者ごとのカルテファイルを参照し，リハビリ動作の評価，および，アドバイスをすることになる．

このように，カルテファイルを利用して，利用者ごとにリハビリ動作の評価とアドバイスを行なうことによって，利用者の身体特性を考慮した体操インストラクタ・ロボット・システムとして改善することができた．

５．今後の計画

これまでの体操インストラクタ・ロボット・システムをベースとして，リハビリ実施施設等で利用できるシステムの構築を目指し，今後は，スーパーインポーズ法を利用したアドバイス方法の改善，一連のリハビリテーション実施中の動きから評価対象となる動作の切り出し方法に関して検討し，体操インストラクタ・ロボット・システムの性能向上を図る．

研究課題名

サウンド提示の感性への効果の研究

研究者名：　自動車システム開発工学科　西口磯春
　　情報メディア学科　黒川真毅

１．研究の目的

本研究は，「次世代ヒューマンメディアを活用した体験・体感型学習支援技術の研究基礎形成」の一環として実施しており，主に音楽音響学の立場から体験・体感型学習支援技術の進展に寄与することを主眼としている．具体的には，

・物理モデルを用いた音源制作技術の開発

・新しい手法(新しい楽器や音源制作技術)を用いた音楽コンテンツ制作

を中心に活動を行う．更に，これらの応用・実践として，

・音楽と食との関連性に着目した一般社会人向けのイベント

を実施する．

２．研究の必要性及び従来の研究

音楽と心の状態(emotion)や感覚的能力についての研究は，近年，新しい展開を見せている．(例えば，P.N. ジュスリン，J.A. スロボダ（編)，音楽と感情の心理学，大串健吾ら（翻訳)，誠信書房，2008)．この原因の一つは，fMRI や PET などの新しい技術により，脳神経科学が急速に発展したことがあげられる（例えば，佐藤正之「音楽はなぜこころに響くのか：医学からのアプローチ」，山田真司・西口磯春編著：音楽はなぜ心に響くのか，第 6 章，コロナ社，2011)．本研究課題の目的に挙げた物理モデルを用いた音源制作技術についても，コンピュータの計算能力の向上を背景に，よりリアリスティックな音源を目指した研究がなされている．(西口)

感覚協調メディアへのサウンド提供を行う上で，作曲家あるいは演奏家の音楽表現の幅を広げることは，音楽の人間の心の状態への寄与を高める上で重要である．本研究では，サラウンド環境を用いた音楽表現の方法にも注目している．従来のサラウンド音楽コンテンツの多くは，ライブ会場の再現や，ミックスの段階でサラウンド化する手法で作られたものであり，演奏者が楽器本体によるサラウンド音響空間を感じながら演奏しているものは見当たらない．本研究では，演奏家の即興的な音楽表現能力を生かすシステムの開発を目指している．(黒川)

３．期待される効果

最終的には，音楽(サウンド)と心の状態(emotion)や感覚的能力の関係の解明に寄与することが期待されるが，これらは広範囲の学問分野を統合してアプローチすべき，非常に

大きなテーマである．本研究においては，その解明に向けて，限定的ではあるが，着実な成果が得られる分野への寄与を目指した基礎研究を行う．具体的には，emotion と音楽の関係を調べる上で重要な音源作成技術の開発を目指す．この技術は，電子楽器の音源としての利用や楽器製作技術への応用等も期待される．（西口）

演奏家の即興的な音楽表現能力を高めることは，感覚協調メディアへのサウンド提供の幅を広げるだけでなく，これまでに無い，新しい音楽の分野として成立することが期待される．（黒川）

４．研究の経過及び結果

これまでに楽器の物理音源モデルの開発を中心に研究を行ってきた．また，音楽と心の状態の関係については，日本音響学会をベースとして関連する研究者との連携を試み，その結果を元に 2011 年度に本を出版している（山田・西口編著；音楽はなぜ心に響くのか，コロナ社，2011 年）．2012 年度は，物理モデルに関する研究を継続するとともに，新しい電気鍵盤楽器の開発を継続した．（西口）

また，これまでに本研究のコンセプトをピアノに適用したサラウンドピアノシステムを開発し，黒川がサウンドクリエーター，西口がプロデュースを担当し，このシステムを用いた 5.1ch の音楽作品を制作して，DVD として商品化しし平成 22 年に発売した．この作品では静止画を用いたが，平成 23 年度は音楽と動画を連携させた音楽作品を制作した．平成 24 年にはこの音楽作品を商品化し，amazon.co.jp 等でも発売された．（西口）（黒川）

さらに，平成 24 年 12 月には，「音楽と食のコラボレーション」とのタイトルの一般社会人向けのイベントを行い，約 40 名の学外からの参加者があった．これらの参加者に対してのアンケートも実施した．（西口）（黒川）

新しい電気鍵盤楽器については，メジャーレーベルのジャズピアニストの目にとまり，この楽器を用いた音楽作品が発表された（西口明宏，PINGO, 2013 年 2 月発売，D-neo ダイキムジカ）． 2013 年度も引き続き，物理モデルに関する研究と新しい電気鍵盤楽器の開発を継続した．この楽器を用いた新譜 CD が発売された．（トライソニーク，ボーダレスアワー，2013 年 7 月発売，ユニバーサル ミュージック）．また，ライブ用に改良した新しい楽器を開発し，全国の 9 箇所のライブ会場で演奏に使用した．（西口）

また，「音楽と食のコラボレーション」については第 3 回を 2014 年 1 月に開催し，前回以上の応募者があった．上述の 5.1ch の音楽作品については，2013 年 5 月に代表的な音楽配信サイトの一つである e-onkyo music から音楽配信を開始した．（西口）（黒川）

５．今後の計画

更に物理音源モデルの開発を進めると共に，楽音が人間の心の状態に与える影響の評価法についても検討を加える予定である．新しい電気鍵盤楽器についても開発を継続予定である．（西口）

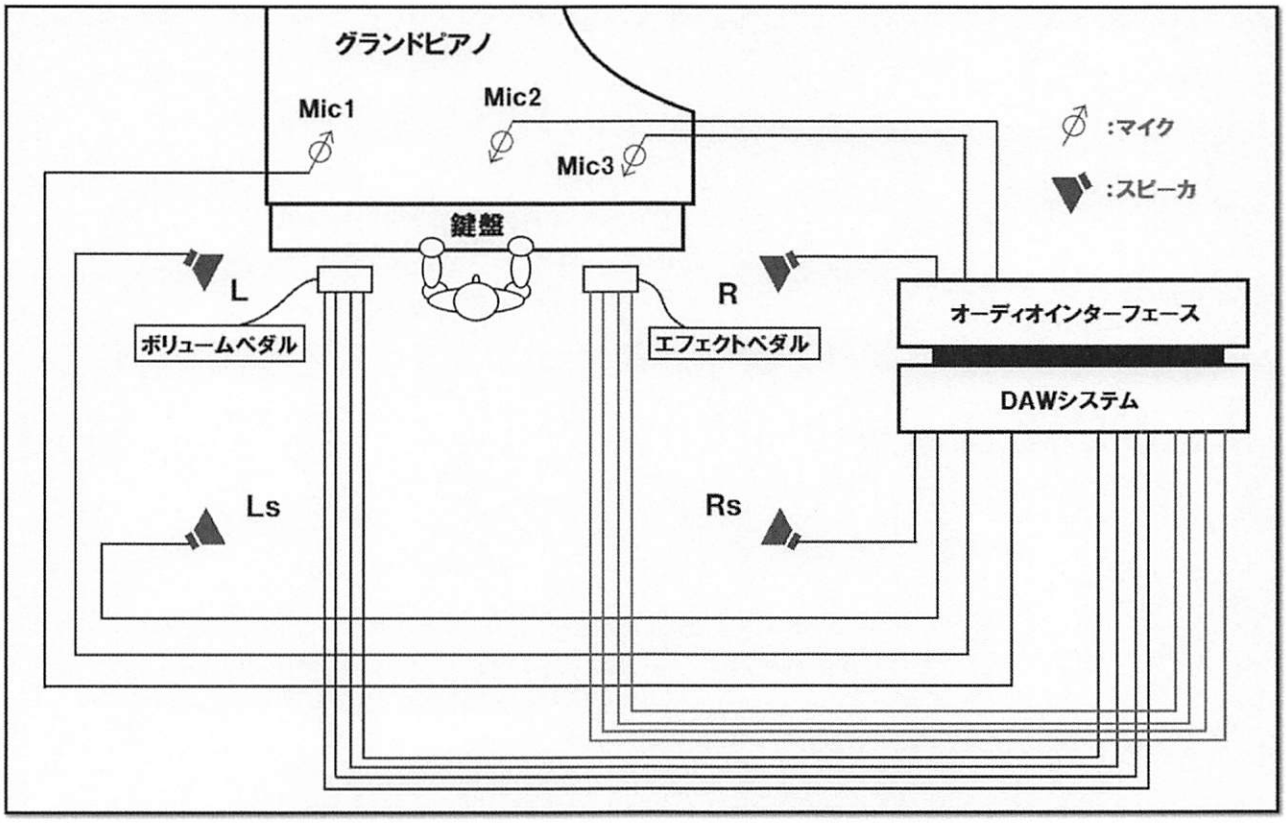
更にサラウンドピアノシステムの表現力（演奏制御機能）の向上を試みると共に，アコースティックベース等への応用を試みる予定である．また，心理実験等によるシステムの評価法についても検討を行いたい．（黒川）

６．研究成果の発表

引き続き，学協会等への論文発表，書籍出版，DVD 等の音楽作品の公開を進めていきたい．ピアノの物理モデルに関しては，2014 年 7 月に新刊を出版予定である（西口(編著)，ピアノの音響学，コロナ社)．（西口）

DiVA ギャラリー

・Surround Piano（サラウンドピアノ）



サラウンドピアノとは、演奏者が演奏と同時に空間表現も可能とすることを目的とした楽器である。通常、楽器の演奏では、音色・音高・音量を扱うことで表現する。空間表現についてはエフェクタを使用するが、演奏中にその空間表現を体感することはできない。そこで、サラウンド環境と DAW ソフトウェア融合させ、演奏者が意図した空間表現を体感しつつ、演奏表現として空間表現も可能な楽器として開発したシステムである。

黒川　真毅
神奈川工科大学 情報学部 情報メディア学科

バイオフィルムおよびバイオファウルリング制御機能付与による分離膜の高機能化および高度利用

（栄養生命科学科）澤井　淳、（応用バイオ科学科）市村 重俊、（応用化学科）森川 浩

1．研究の目的

近年、膜分離法を利用した各種の処理プロセスが国内外で注目されている。しかし、多孔質膜と非多孔質膜のいずれにおいても微生物汚染による膜性能の低下（バイオファウリング）やバイオフィルム形成による食中毒や感染症の発生（例：雪印乳業の大規模黄色ブドウ球菌食中毒はバイオフィルムが原因）が問題となっており、その対策として、各種前処理や化学薬品による膜の洗浄が必要とされている。

本研究では、非多孔膜（シリコーン膜およびキトサン膜）は、パーベーパレーション法や脂溶成分の分離を対象とし、微生物細胞が膜表面へ接触した際の殺菌及びバイオフィルム形成阻害を目的としてヨウ素や金属キレート化合物をシリコーン膜に含浸及び固定化した膜を調製し、抗菌性と分離特性を定量的に評価する。また、多孔膜では、海水淡水化や膜分離活性汚泥法を対象とし、バイオファウリングの発生原因と推測されている糖タンパクの吸着に対する膜のリン脂質ポリマー処理の効果を検討する。さらに、調製した分離膜のキャラクタリゼーションを詳細に行い、非多孔質膜から多孔質膜におけるバイオフィルムおよびバイオファウリング制御機能に優れた分離膜を開発することを目的とする。

これまでの経過：非多孔性膜においては、1年目（H23）では、疎水性シリコーン膜にヨウ素を含浸させ、微生物制御として増殖の抑制および殺菌の効果が確認された。しかしながら、調製したヨウ素含浸シリコーン膜は、ヨウ素が膜から揮散、溶出してしまい長期間に渡って抗菌活性を保持することができなかった。そこで2年目(H24)においては、銀錯体（キレートあるいはオレイン酸錯体）含浸シリコーン膜、ヨウ素—銀錯体をシリコーン膜上で形成させ、抗菌活性を同様に確認し、さらに活性の持続が可能であった。さらにヨウ素-銀錯体(AgI)含浸シリコーン膜では銀の溶出を極めて低く抑えることにも成功した。<u>今後の課題は最適成膜条件の把握と親水性非多孔性膜(キトサン膜)の開発である。</u>

また、多孔性膜においては、リン脂質ポリマー（MPC ポリマー）により表面処理したセラミック膜の耐汚染性を評価している。1年目は、逆浸透海水淡水化法の前処理や膜分離活性汚泥法において問題となっている多糖類を対象として表面処理の効果を検討し、その効果が膜の細孔径およびろ過条件に依存することを確認した。そこで 2 年目は、多糖類を溶質としたモデル系とともに実海水を利用し、性能に対する細孔径、ろ過条件、表面処理条件の影響について検討した。一方、微生物汚染（バイオファウリング）に対しては高い抑制効果を確認した。<u>今後の課題は、膜性能に対する水質およびろ過条件の影響を明らかにし、耐久性に優れた膜を開発することである。</u>

以上を踏まえ、平成25年度における目的・目標は以下の通りとした。

①銀含浸親水性および疎水性非多孔性膜によるバイオフィルム制御

親水性非多孔性膜であるキトサン膜を調製し、銀を含浸させ抗菌活性の向上を図る。コンダクタンス法によりバイオフィルム形成抑制能を検討する。また、H24 年度に行った AgI 含浸シリコーン膜についても成膜条件の詳細な検討を行う。

② ナノ細孔セラミック膜のリン脂質ポリマー処理とバイオファウリング抑制効果の評価

海水および廃水を利用して膜の性能評価を行い、特に耐久性について明らかにする。あわせて表面処理による洗浄性の向上についても検討する。また、膜のキャラクタリゼーションにより表面状態と膜性能との相関を明らかにする。

2. 研究の必要性及び従来の研究

ファウリングは難溶性成分や高分子の溶質、コロイド、微小固形物などが膜に沈着し、透過流束を低下させる。また、微生物が膜表面に付着し、バイオフィルムを形成することで、同様に効率の低下を引き起こす場合もある。浮遊状態の微生物に比べ、バイオフィルム状態の微生物は種々の処理に対して著しい抵抗性を示し、一度形成するとその除去は非常に困難である。そのため、分離膜、特に多孔質膜のファウリング抑制のために様々な表面加工が試みられている。代表的な試みとして、TiO_2（光触媒）による表面処理[3]があり微生物の付着抑制に対する効果が検討されている。近年は、双性イオン性ポリマー（zwitterionic polymer）による表面処理も試みられており[4]、界面の水の状態の制御が注目されている。また、非多孔質の高分子材料への抗菌活性の付与も試みられている。抗菌剤のブレンド[5]、グラフト重合による抗菌剤の付与[6]等が行われているが、抗菌加工処理による分離性能変化に関する報告は殆どない。Yu ら[7]は、硝酸銀を混練し乾湿式紡糸して作製したポリアクリルニトリル中空糸膜が抗菌活性を示すが、通水後、活性が低下し銀を再充填する必要があることを報告している。

3. 期待される効果

本研究は、以上の知見をもとに、バイオフィルムおよびバイオファウリング制御機能を持つ新たな分離膜の開発を目指すものである。分離膜自体に抗菌性を付与させる研究は極めて少なく独創的なものである。しかも分離膜については非多孔質膜（親水性膜から疎水性膜まで）から多孔質膜までの広範な範囲をカバーしており、国内外のバイオフィルムおよびバイオファウリング対策の研究をリードできる内容である。また、膜分離を利用した処理プロセス全体の効率化・低コスト化、さらに安全性の強化につながるものであり、環境分野および食品分野における波及効果は大きい。さらに、膜材料の構造・物性・機能の相互理解が進み、より高機能な材料の開発および高度利用につながる新たな界面制御法の指針が得られることが期待される。

4. 研究の経過及び結果

4.1 銀含浸親水性および疎水性非多孔性分離膜によるバイオフィルム制御

親水性キトサン膜：分離膜の抗菌活性を強化することを目的とし，無機系抗菌剤である銀を含有したキトサン/ 銀ハイドロゲル膜を創製し，膜の諸特性，透水性能，並びに抗菌特性に及ぼす膜作製方法の影響について検討を行った．浸漬法と混合法の 2 つの方法で作製したゲル膜は，何れも大腸菌及び黄色ブドウ球菌に対して顕著な増殖抑制効果を示した．また，銀が粒子として含有された混合法調製膜と比べて，銀イオンとして含有されている浸漬法調製膜が強い抗菌活性を示した．膜モジュールとしての長期的な運転を視野に入れた場合，徐放性や安定性などから，混合法調製膜の方が実用的であると考えられる。

疎水性シリコーン膜：昨年度作製した AgI 含浸シリコーン分離膜の最適成膜条件を検討した。膜を浸漬する I_2 処理濃度が高くなるほど、作製した膜の抗菌活性値は上昇した。一方、その後の $AgNO_3$ 処理濃度を変えても抗菌活性値は変化せず、シリコーン膜への I_2 の含浸量が抗菌活性を決定することが分かった。さらに、I_2 処理時間は 6 h、$AgNO_3$ 処理時間は 12 h が最適であった。その条件で作製することで、抗菌活性値は昨年の 4 から 6 へ上昇し、作用を 100 倍に高めることができた。

4.2 ナノ細孔セラミック膜のリン脂質ポリマー処理とバイオファウリング抑制効果の評価

さまざまな条件でセラミック膜の表面処理を行い、透水性、耐ファウリング性、分画性を評価した。その結果、ポリマー濃度を高くした場合および処理時間を長くした場合に耐ファウリング性が向上した。しかし、処理量の増加とともに透水性は低下した。また、ファウリング膜を純水で洗浄したところ、性能回復率は未処理膜に比べ高い値を示した。リン脂質ポリマーはセラミック膜表面のシラノール基とシランカップリング反応により固定されるため、さらに、反応時の pH と水の影響についても検討した。この場合も透水性が低下したが、分画性の著しい向上が見られた。

5．今後の計画

i)外部研究助成等への応募:共同研究として科研費および民間研究費助成への応募を検討。

ii)産学協同研究：学会やイノベーションジャパンでの発表において水処理会社、製薬会社、食品会社、化粧品会社からの問い合わせもあり、大いに期待できる。

iii)特許等工業所有権取得：2007 年の出願に続き、今後も重要な技術は随時権利化を目指す予定である。

iv)その他：国内外での学会発表および原著論文として投稿する。

6．研究成果の発表

6.1. 研究論文

1) 冨田和寿、菊地幹夫、澤井淳：前培養の温度条件が微生物の活性炭への付着に及ぼす

影響. 防菌防徽, **41** (5) 245-248 (2013. 5).

2) Sawai, J., K. Nagasawa, K. and Kikuchi, M.: Ability of heated scallop-shell powder to disinfect *Staphylococcus aureus* biofilm. *Food Science and Technology Research*, **19** (4) 561-568 (2013. 7).

3) Kubo, M., Ohshima, Y., Irie, F., Kikuchi, M. and Sawai, J.: Disinfection treatment of heated scallop-shell powder on biofilm of *Escherichia coli* ATCC 25922 surrogated for *E. coli* O157:H7. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, **4** (4A) 10-19 (2013. 12).

4) 高橋智輝，山口雄也，澤井淳，小林大祐，庄野厚，松山秀人，大竹勝人: キトサン/銀ハイドロゲル膜の創製と抗菌特性に及ぼす膜作製方法の影響. 日本海水学会誌, **68** (2), 81-88 (2014. 4).

6. 2. 学会発表

○鶴田 純平、久保 健治、澤井淳：抗菌生物活性を有するシリコーン膜の開発. 日本防菌防徽学会第 40 回年次大会、11Pp-60、大阪、千里ライフサイエンスセンター (2013. 9)
他 16 件

○市村重俊、内田典子、石原一彦：ナノ粒子の膜透過性と MPC ポリマーによる表面処理の影響、日本膜学会第 35 回年会、早稲田大学西早稲田キャンパス (2013. 5)
他 5 件

文献

1) 中村欣司、澤井淳、菊地幹夫：ヨウ素徐放性シリコーン膜の抗微生物特性. 防菌防徽, **39** (6), 337-342 (2011).

2) 石原、市村ら、特願平 2005-061660)

3) Kochkodan V., Tsarenko S., Potapchenko N., Kosinova V. and Goncharuk V. (2008) Adhesion of microorganisms to polymer membranes: a photobactericidal effect of surface treatment with TiO_2, *Desalination*, **220**, 380–385

4) Zhang Q., Zhang S., Dai L. and Chen X. (2010) Novel zwitterionic poly(arylene ether sulfone)s as antifouling membrane material, J. Membr.Sci., 349, 217-224.

5) Katano, H. and Tsukatani, T. (2010) Viscoelasticity, leachability, and antimicrobial activity of poly(vinyl chloride) blended with benzyldimethyltetradecylammonium bis(2-ethylhexyl) sulfonatosuccinate. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **83**, 190-194.

6) Ang, Y. F., Wan, L. S. and Xu, Z. K. (2010) Surface hydrophilisation and antibacterial functionalisation for microporous polypropylene membranes. *Water Sci. Technol.*, **61**, 2053-2060.

7) Yu, D.G., Teng, M.Y., Chou, W.L. and Yang, M.C. (2003) Characterization and inhibitory effect of antibacterial PAN-based hollow fiber loaded with silver nitrate. *J. Membr. Sci.*, **225**, 115-123.

視覚媒体を活用した定量的食事調査法の開発

栄養生命科学科　原島恵美子

1. 研究の目的

定量的食事調査法には食事記録法と24時間思い出し法とがあるが、いずれの方法にも長所短所がある。国際的に採用されることが多い24時間思い出し法は、対象者の負担が比較的少ない半面、過去の思い出しによるバイアスが短所としてあげられる。本研究では、このバイアスを少なくするために、映像により表現された食材・料理媒体およびデジタルカメラ機能付き携帯電話により食事前後に撮影された写真を利用した24時間食事思い出し法（以下、単に携帯電話法という）を考案し、その標準化を行う。

2. 研究の必要性及び従来の研究

公衆栄養学における栄養摂取状態をアセスメントする方法には、食事調査、身体計測、生化学的検査（特に尿中、血中栄養素濃度）、臨床医学的所見、その他がある。その中で、エネルギー、必須栄養素摂取量を包括的にアセスメントできる方法が食事調査である。しかし、技術的、時間的制約が大きいため、定性あるいは半定量的な方法が採用されているのが現状である。食事摂取量を定量的に評価する食事調査法には食事記録法と24時間思い出し法とがある。現行の食事調査法の中で最も真の値に近いデータが得られるとされる秤量記録法は技術的な問題点が多い。調査対象者が正確に秤量出来るようにするには、食品や調理法に関する知識や技術の訓練が必要である。また、勤務者の昼食は、外食、市販の弁当購入のことが多く、食堂、レストラン等で食品を分離して、秤量することはほぼ不可能である。さらに加工品・調理済み食品の増加など、食生活の多様化に伴い、家庭内の食事においても含まれている食品や調味料などが不明な場合もある。国際的に広く採用されている24時間思い出し法は、対象者の負担が比較的少ない半面、過去の思い出しによるバイアスが短所としてあげられる。すなわち、摂取食品の同定とその重量推定である。携帯電話によって撮影された写真の利用は、このバイアスを少なくするための有用な手段と考えられる。また、食事摂取基準の適用には、定量的かつ習慣的な摂取量を必要とする。厚生労働省によって毎年行われている国民健康・栄養調査は、一般の人が調査者となっていること、妥当性の検討がなされたことがないことなどの理由により、国際的には評価が低い。食事調査による結果は、特にエネルギー摂取量は過少申告の傾向が強い。視覚媒体の活用と写真撮影像の利用は、この短所を少なくすることが期待され、定量的食事調査法のニーズに応えるものである。

3. 期待される効果

「携帯電話法」の標準化に成功すると、各地域（国、都道府県、市町村等）でのエネル

ギー、栄養素摂取量の相互比較が可能となる。将来的には、非連続 2 日間の調査により、あるいは、食事の個人内変動（日間変動）を取り除く方法を用いて、習慣的なエネルギー、栄養素摂取量をアセスメントできるようにする。それを受けて、コホート研究に応用する。食事療法・栄養補給法の有効性を評価するためには、無作為化比較試験（RCT）を実施しなければならない。この際にも「携帯電話法」利用することが出来る。

4. 研究の経過および結果

平成 25 年度は、携帯電話法によるエネルギー摂取量に大きく影響を与える、主食の「ご飯」の重量推定の精度を上げるための検討を行った。

携帯電話法を実施する際は、対象者とのインタビューにおいて実物大写真を用いて面接者と対象者の共通の重量概念の把握を行う。特に主食の「ご飯」の重量推定は、エネルギー摂取量に大きく影響を与えることから、ツールの検討やマニュアルへの詳細な手順の記載を必要とする。そこで聞き取りにおいて、男性用、女性用、子供用の異なる器で盛り付けられた実物大写真をツールとして用いた推定重量と、秤量法により測定した重量との比較を行った。

1）主食（ご飯）の重量推定

調査対象者（男性 30 名）に 1 日に摂取したすべての食事の「食べる前」と「食べた後」について携帯電話カメラによる写真撮影を依頼した。また、供された食事は、調査対象者に分からないように配慮し、秤量担当者が料理名、食品名、重量を記録した。翌日に、訓練を受けた管理栄養士が調査対象者によって写された写真画像を用いて携帯電話法を実施した（図 1）。ご飯は、男性用飯碗に 150g 盛り付けた実物大写真、女性用飯碗 100g、子供用飯碗 80g、どんぶり 200g、300g、洋皿 200g、300g の計 7 種類の実物大写真を用いて聞き取りを行った。

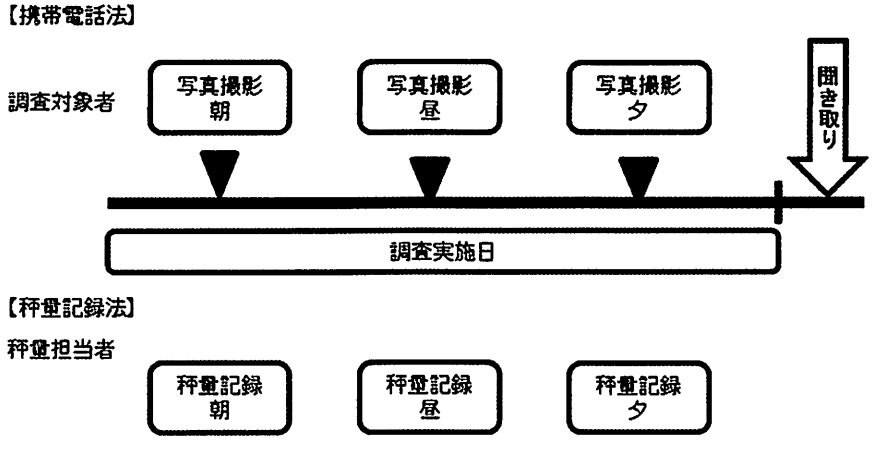


図1 調査の流れ

携帯電話法による推定重量は、実際の重量との隔たりが見られた（図 2）。携帯電話法によるご飯の推定重量は 150g に集中したが、実重量に対して過小評価が多くみられた。その理由として、調査対象者が男性であり、実物大写真の男性用飯碗 150g に回答が集中した。調査対象者の思い込みや器の大きさや形状、盛り付け加減などの詳細な情報の把握不足が重量推定の過小評価を招いたものと考える。

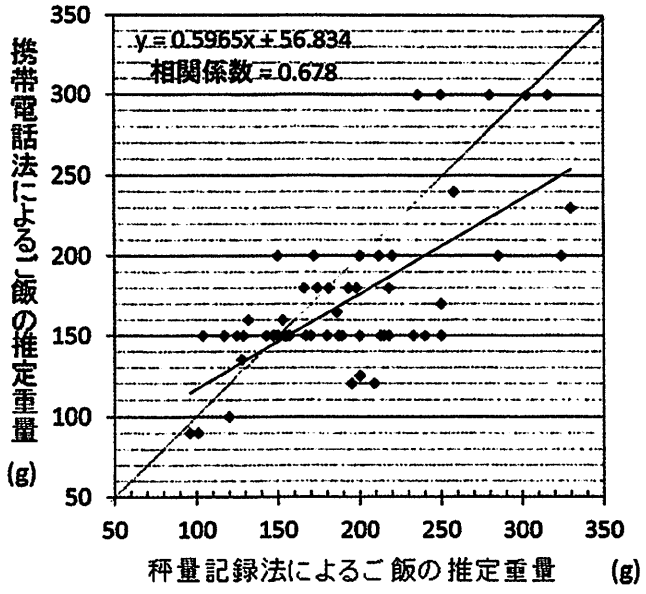


図2　ごはん重量推定の相関

調査日の 1 日の食事について、携帯電話法、秤量法において算出した総エネルギー摂取量との関連を図 3 に示した。

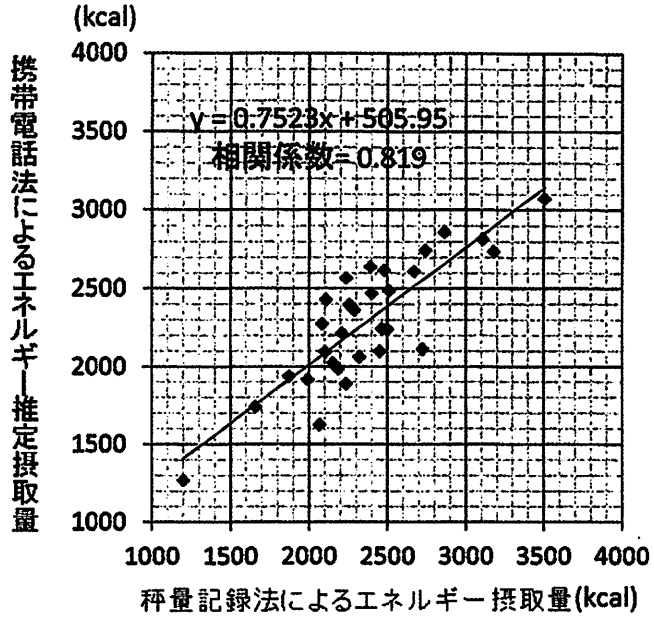


図3　総エネルギー摂取量推定の関連

エネルギー推定の誤差に大きく影響を与える「ご飯」の重量推定の影響を考慮するため、携帯法の「ご飯」の重量をすべて秤量法の「ご飯」の重量に置き換え、その分散の割合を算出したところ、エネルギーでは 49.8%であった。また、同様にたんぱく質では 17.4%、脂質では 0.8%であった。ご飯の重量を秤量法の重量に置き換えたエネルギー場合の、秤量法との相関係数は、0.819 から 0.902 に向上した。

エネルギー摂取量に大きく影響を与える主食の「ご飯」の重量推定の精度を上げるためには、実物大写真の改良とマニュアルへ聞き取り項目や画像確認について詳細に記載することで対応可能と考えた。

2) 市販おにぎりの重量調査

近年、「おにぎり」をコンビニエンスストアで購入することが多いと考えられることから、各種コンビニエンスストアで販売されている「おにぎり」についてそれぞれの重量を測定し、料理データベースへの蓄積を図った。携帯電話法では、商品の写真や購入店舗と商品名の情報を調査対象者から入手できれば、食品同定および重量推定は容易なため、実物大写真ではなく、データベースへ加えるのみとした。

コンビニエンスストア 3 社（L 社、S 社、T 社）について、各社ＨＰより販売されている「おにぎり」を検索しリストを作成した。各社 18～20 種のおにぎりが提供されていた。そのうち、3 社共通の具材（ツナマヨネーズ、焼きたらこ、梅）について①ご飯、②具材、③海苔に分けて重量の測定を行った。

重量測定の結果、ご飯と海苔の間にフィルムが入っている三角型の標準タイプのおにぎりでは、ごはん約 100g、具材 3～5g、海苔約 1g であった。具の入り方として、中に広範囲に広げて入っているものと、真ん中にまとまって入っているなどの特徴が店舗によって観察された。丸型で海苔がご飯についているおにぎりは、ごはん 90g、具材 5g、海苔 0.5g が適当であると判断された。

5. 今後の計画

食事調査法の確立には妥当性に加え再現性の検証が必要であるため、再現性試験を実施中である。6 ヵ月の間隔をあけて同一面接者、同一対象者において携帯電話法を実施しており平成 26 年度に完了予定である。

6. 研究成果の発表

「携帯電話法」の概要、調査マニュアル等については書籍として出版し、妥当性については、学術雑誌に投稿する予定である。

精神ストレスおよび日常動作の簡易客観評価のための測定器の開発

神奈川工科大学応用バイオ科学部　准教授 澤井明香

1. 研究目的

現代社会において生活習慣病の罹患は大きな問題となっている。生活習慣病の罹患には、肥満や精神ストレスが関与すると言われている。肥満は摂取エネルギーと消費エネルギーのアンバランスが大きく関わると考えられ、その一方で、日本人の摂取エネルギーの総量は、過去の報告より、歴史的に見て最近での大きな変化はみられておらず、近年の生活習慣病の罹患と肥満との関係は、消費エネルギーの減少や、食事摂取のタイミングが過去の生活から崩れ、生活リズムの変化が大きく変化したこと。精神ストレス等による油脂類や甘味料の生理的要求を満たすための、スナック菓子や甘味料の食品の偏重および上記食品を多量摂取する食習慣もその要因として知られている。

我々は横浜市立大学医学研究科およびセイコーエプソン社との共同により、一日の消費エネルギーを睡眠、身体活動、精神活動ともに測定が可能であり、かつ、簡易客観評価できる機器(ストレス・カロリー計)を開発した(図 1)。当機は、端末タブレット内に内蔵された換算式を用いると、睡眠時基底心拍数から覚醒時の心拍数との上昇差から、個人の身体または精神活動状況に応じてエネルギー消費量を換算し、一日の消費エネルギーを、簡易により詳細に評価できる可能性がある。すなわち、従来は身体活動時のエネルギー消費量を主としてきた腕時計などの携帯型の簡易代謝測定器よりも、当機を用いると身体・精神活動や睡眠時間、生活リズムについて、ウエラブルに評価が可能と考えられる。そこで本研究では開発品の精度と日常生活への応用を確かめるため、既製の機器(携帯型心電計：TM2425-ECG, A&D 社製)　(代謝器：Power Lab, BRC 社製)(歩数計：Yamasa 社製)との比較を行った。

図 1：腕時計型健康情報モニター
(ストレス・カロリー計)

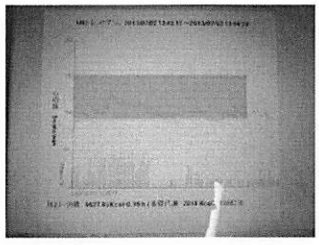


図 2：タブレット端末

2. 研究の必要性及び従来の研究

精神ストレスは生活習慣病の主となる疾患の 1 つである循環器疾患罹患の危険因子として知られており、日常生活におけるストレスの簡易客観評価は、ストレスによる循環動態の急激な変動とこの状態が継続することによる循環器疾患への罹患を事前にとらえるために大変重要である。また、肥満の是正のための栄養指導は、摂取エネルギー量の適正化と消費エネルギーの増大を目指しているが、まず、摂取エネルギーの適正化においては、個人の体格や日常の生活活動に併せた必要栄養量を算出し、これを遵守することによりエネルギー出納の適正維持を志し、必要栄養量と摂取量の算定は、摂取量は食事調査法、食堂や給食施設の献立表、食事のデジカメ映像等、様々なツールを利用して情報を得るように、現在多くの者が研究を重ねており、なかには企業の参入により商品化されたツールもあるが、これらは日

本人の食事摂取量の変遷を考慮した場合、現代がエネルギー過多に相当する時代なのではなく、むしろ摂取総エネルギー量は以前より減少しているような状況にある。つまり、生活習慣病の罹患と肥満の関係は、エネルギー摂取量の過剰の問題よりも、摂取した食品の種類や、エネルギーの消費側に大きな要因があると考えられる。しかしながら現在もなお、エネルギーの消費量の評価は、対象者の自己申告や観察記録(行動記録表)、あるいは歩数計による身体活動の把握程度であり、代表的な客観評価のツールとして用いられる歩数計では、負荷の大きさの把握には限界があり、心拍計を利用したツールも、集団を対象とした代表値を代入した運動強度の大雑把な評価にとどまっており、これでは個人の客観評価が充分可能であるとは言い難い。

また、日本人の生活は、記述のように睡眠、精神活動、身体活動の順に時間が長く、歩数計および心拍数は身体活動時のみの消費量に限定されるため、歩数計や身体活動時のみの心拍計では一日中の消費量の客観評価は難しい。

このような生活実態を考慮し一日の消費エネルギーを簡易客観評価するために、まず、当研究の先駆けとして、我々の研究グループでは、睡眠と精神活動（ストレス）時のみの消費カロリーを評価する機器を開発しており、当測定器（ストレスメーター）は、英語論文として報告している。因みに、これまで精神活動の評価が困難であった点は、安静値をどこに設定するのか、が対応できていなかったためであり、当機では安静値を睡眠中の最も低い心拍数（睡眠中の累積心拍数の１％値）を基底心拍とし、これを基準に覚醒時の心拍数の上昇度を評価している。

ストレスメーターにより精神活動時の心拍変動の評価が可能となったため今後は、睡眠、精神活動、のみでなく、身体活動も含め、総合的なエネルギー消費量を評価し得るものが求められる。

３．期待される効果

当開発品は、心拍計と加速度計が内蔵されており、睡眠中の基底心拍を基準として、これらの変動の組み合わせにより、睡眠時、精神活動、睡眠活動におけるストレス状況と消費カロリーが評価可能となると考えられる。ある程度以上の精度が確認されれば、当装置の学術的理論（基底心拍数、加速度、心拍数の組み合わせ）と社会での利用価値があると考える。特に、当機を利用すると生活習慣病の保健指導に役立つ可能性がある。

４．研究の経過および結果

研究方法

被験者は本学の大学生男子20名（21.2±1.6歳）男性とした。BMI　は22.0±3.3〔kg/m^2〕であった。書面にてインフォームドコンセントをとり、ヘルシンキ宣言に基づき以下の実験を施行した。

装着装置：生体情報モニター（健康腕時計，セイコーエプソン製）および生体情報モニター端末タブレット（ONKYO製）（図1，2）、携帯型血圧心電計（TM2425-ECG,, A&D製）（図3）、歩数計（Yamasa製）（図4）心電および代謝測定器（Power　Lab,　BRC製）（図5）

図3.(携帯型心電計：TM2425-ECG, A&D社製)

図4.(歩数計：Yamasa社製)

図5.(代謝器：Power Lab, BRC社製)

図6.トレッドミル

操作：①開発モデル（図 1,2）を利き腕の反対の腕に 24 時間装着し、日常生活で使用して心拍、加速度、歩数、睡眠時間について、携帯型心電計（図 3）と歩数計（図 4）を装着し、被験者の行動記録表(観察記録を遂次記入したもの)から得た動作と比較し、両者の関係を調べた。なお被験行動記録表には、歩行、走行、食事、睡眠、座位は必ず記録した。さらに翌日、起床時間と就寝時間の問診を行い、思い出しによる睡眠時間と生体情報モニターから得た睡眠時間の比較についても検討した。なお、生体情報モニターは、事前に身長、体重、年齢を設定し、さらに 3 分間の足踏みを行い、個人別の足踏みによる心拍変動を認識させた後に 24 時間計測をおこなった。

②①とは別日において、被験者は食後 1 時間半以上経過した食事による代謝変動の影響が極めて少ない状態にて実験をおこなった。開発モデルが、睡眠・精神活動・身体活動時のいずれのエネルギー消費量も簡易客観評価し得るのか、特定の活動時における既存の精密機種とのエネルギー消費量等の精度比較を行った。なお特定活動は、安静 20 分とストレス負荷（暗算、人前スピーチ、顔再認試験）と、トレッドミル（図 6）上における身体活動（散歩：2.5km/hr, 通常歩行：4.0km/hr, 速歩：6.5km/hr, ジョギング：7.5m/hr）とし、各活動は休憩を挟み 10 分間とした（図 7）。ストレス負荷は、暗算は 4 ケタから 2 ケタの整数を順次減算する順次減算法により行った。人前スピーチは、複数の聴衆の前で、突然与えられた題目について発表をおこなった。顔再認試験では事前に 30 秒間で記憶した顔写真について、56 名の顔写真の中から一枚を選択した。

安静	20分
暗算	10分
人前スピーチ	10分
顔再認試験	10分
散歩(2.5Km/hr)	10分
歩行(4.0km/hr)	10分
速歩(6.5km/hr)	10分
ジョギング (7.5km/hr)	10分

図7　特定活動の実験プロトコール

図8ストレス負荷試験の詳細

統計処理：　SPSS ver 17. for windows を用いて、開発モデルと既製品から得たデータを比較し、相関係数（r）を算出し、危険率 5%を有意水準とした。

研究結果

開発モデルの加速度が殆どなく、低い心拍数が長時間継続する期間を睡眠中とみなし、これを被験者が遂次記録した行動記録表の睡眠時間（7.11±1.99 時間）と照合すると、睡眠時間帯はほぼ一致した。な

お、24 時間計測終了後に実施した問診による自己申告の睡眠時間は 6.8±2.4 時間であり、行動記録表や生体情報モニターとの間には誤差が生じた（表 2）。

また 24 時間計測の心拍数、睡眠時心拍数、睡眠時基底心拍数は、平均値がほぼ等しく、いずれも既存機器との間に相関係数(r)0.8 以上の有意な正相関を示した（図 8-10）。

表2.機種別各項目平均値

	24時間計測の心拍数	睡眠時心拍数	基底心拍数	歩数
生体情報モニター	69.9±8.3	54.4±7.8	46.6±7.2	10308±5548
TM2425-ECG	70.3±10.7	53.0±8.3	53.1±8.2	
歩数計				8881±3399

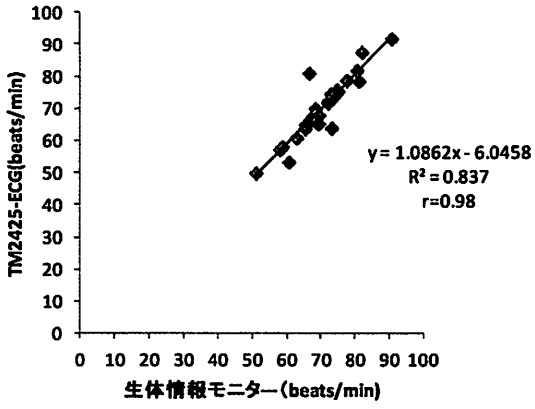


図 8. 24 時間心拍数の比較

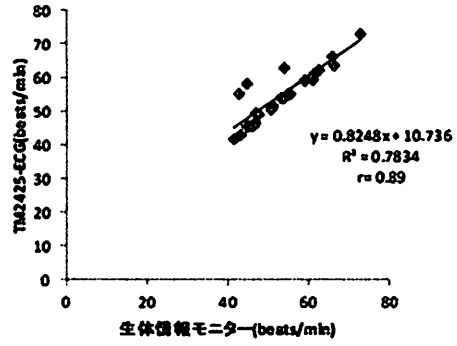


図 9. 睡眠中の心拍数の比較

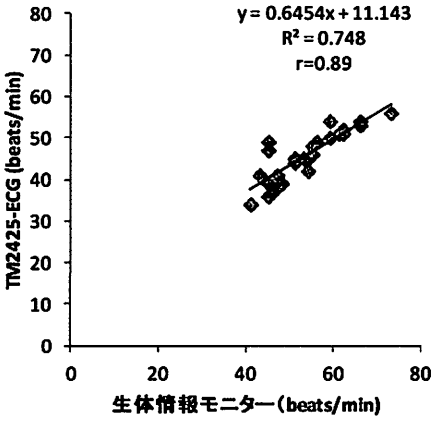


図 10. 基底心拍数の比較

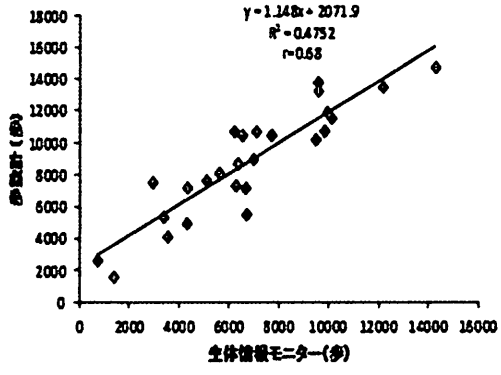


図 11. 歩数計の比較

歩数も既存器と有意な正相関を示した（図 11）。

安静値および精神活動時の心拍数は既存精密機器との間に r=0.8 以上の有意な正相関がみられた。
活動別に詳細な比較では、精神活動ではどの活動においても個人間での心拍の上昇差は小さく、この傾向は開発器も既存器も同様であった。一方、身体活動では心拍の上昇が個人間で異なり、身体活動強度が高くなるほど、変動幅は広がり、特に速歩やジョギングでは標準偏差が大きかった（図 13,14)。

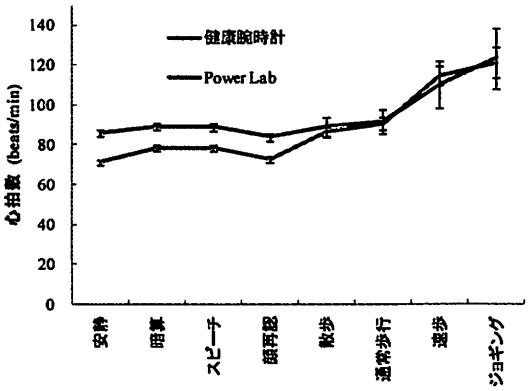


図 13. 特定活動時の心拍数の比較

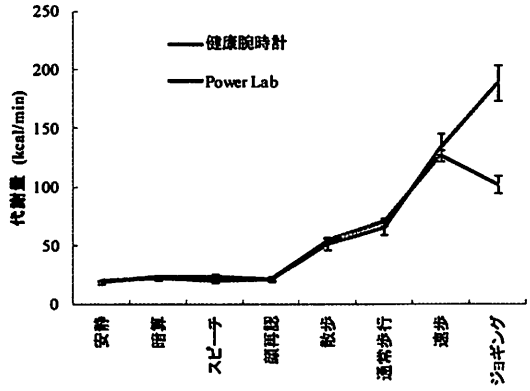


図 14. 特定活動時の代謝値の比較

代謝値も、心拍数と同様に既存器と開発器の間には有意な正相関がみられた。精神活動と身体活動を総合した比較においては、生体情報モニターは既存精密機器 PowerLab との間に r=0.89 の高い有意な正相関が示された（図 15)。また近似曲線の傾きは 1.0681、切片は-0.6328 であり、生体情報モニターから得た代謝値の実測値と Power Lab の実測値はほぼ同等の数値を示すことが示された。グラフを見ると心拍数と同様に精神活動のような運動と比較すると心肺機能が著しく亢進はしない活動では、個人間変動は小さいが、身体活動では運動強度が高くなるにつれて、個人間変動が大きく生じることが推察された（図 15)。

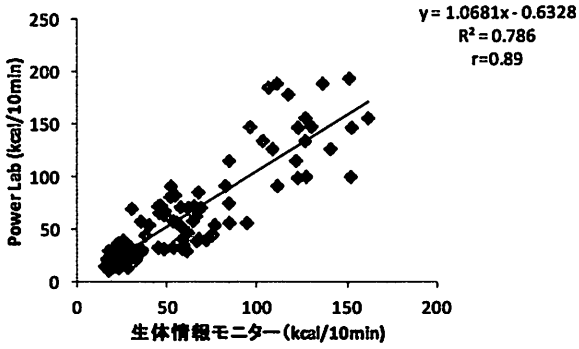


図 15. 全活動における代謝値の比較

しかしながら、精神活動時のみと身体活動時のみに分けて検討すると、精神ストレス時は r=0.39、身体活動時は r=0.77 であり、精神活動の方が相関係数は低かった。

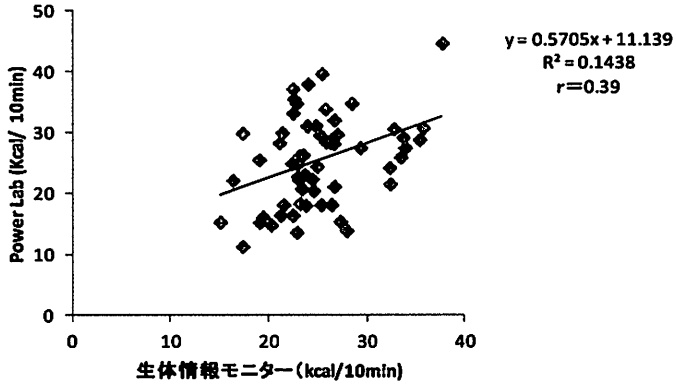


図 16.精神ストレス負荷時の代謝値の比較

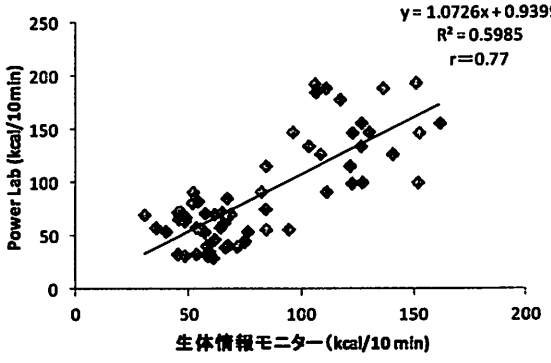


図 17. 身体活動時の代謝値の比較

考察

腕時計型ストレス・カロリー計と、既存機種（携帯型心電計、歩数計、心電計機能付きの代謝器）との精度比較を行った。睡眠時間の評価については、被験者が遂次自身の行動を記録用紙に記入し、この記録とストレス・カロリー計の測定値を照合したところ、両者はほぼ一致していた。このことは、我々

の開発したストレス・カロリー計が、まず睡眠時間の客観的な評価に役立つことを示したと考える。モニターの詳細をみると、夜中の起床と思われる箇所を確認することもできた。

なお睡眠時間は、本研究では 24 時間の行動記録をつけ、さらに測定終了時に思い出し法による問診を試行した。これは医療機関受診の際に医師等による問診に患者が回答する場合を想定したものである。本研究の被験者は実験プロトコール上、前日の 24 時間にわたる行動記録において、就寝時間や起床時間を記録しているため、問診時の回答では多少は記憶に残るはずであるが、それでも平均で約 20 分の睡眠時間の誤差が生じた。またモニターの詳細を見ると、夜中に覚醒し再び入睡した者もあった。このような人物の中には 2 回目の睡眠時間を問診では申告しない者もおり、これを実生活に勘案すると医療機関受診時の睡眠時間の過小申告に通ずるものと思われ、自己申告では、思い出しと過小申告の双方のバイアスによる睡眠時間の違いのさらなる拡長が推察された。

24 時間計測による心拍変動の相関係数は極めて高く、開発器は心拍変動を明確にとらえることが確認できた。覚醒状態では、身体を安静に保っていても精神状態の緊張が生じることが多々ある。例えば、生活習慣病の治療目的等で受診する医療機関では白衣性高血圧に代表される医師の問診による精神の向上に伴う心拍数や血圧値等の循環動態の上昇がみられることがある。我々は、睡眠中の最も低い心拍数や血圧値を基底心拍数あるいは基底血圧値ととらえて、基底値からの上昇度を評価することで、循環動態の指標にすることを提案してきた。本装置は通常の男性用腕時計程度の重量であり、心電計の装着よりも安易に睡眠中の基底心拍数を測定できる。覚醒時の様々な心拍変動を基底心拍数からの上昇度としてとらえることで、精神ストレスにより交感神経系が亢進された状況下での評価よりも安定した心拍を評価することが可能と考える。　本器の 24 時間装着の測定結果は、睡眠時心拍変動、24 時間心拍変動の他に睡眠時基底心拍数も既存の血圧心電計と高い相関を示しており、当器が心拍変動を適切に捉えることが示された。

特定活動時の既存の心電および代謝器と比較において、本研究での活動時間は各々10 分間と短時間での比較ではあったが、様々な精神活動および身体活動時の既存器と開発器の心拍変動の相関係数は高い値を示した。代謝値についても、高い相関がみられたことから開発機が既存の心電および代謝器に類似する性能を持つことが示唆された。

なお、代謝値について詳細をみると、精神活動負荷における変動の相関係数は r =0.39 であり、活動を個別に比較すると暗算では r=0.57 と高かったが、人前スピーチ、顔再認試験は相関が低かった。これは人前スピーチや顔再認知試験では人により身振りが入り、当測定器は一定以上の動きがみられた場合は、制御機構が作動する仕組みになっていることや、身振りの程度に個人差が生じたことが考えられる。また、心拍変動の上昇度を示す非体動係数の平均値は 1.7 であり概ね 0.5～3 の間であり、個人間変動は小さかったため、これらは、健康成人（大学生）を対象とした精度検定であったため、ストレスに対する心拍数の変動幅がもともと小さく、つまり健常若年者のため、生体内反応として、ストレス時の心拍上昇が制御されていて結果として大きな変動幅とならなかったことも考えられ、これらは、ストレスに対して血圧等の循環動態への影響が激しくなると思われる中年者以上においての評価が必要であると考える。

一方、身体活動負荷における変動は全体としては、r=0.77 の高い正相関が得られたが、散歩や通常歩行、速歩では、測定値の個人間変動は大きくはなく、個別の比較を行うと相関は決して高いものではなかった。身体活動による心拍変動の違いは個人間で大きく、体動係数をみると平均で 4.5 ではあるが、その幅は 1.5～10.0 の間であり、精神活動の非体動係数の幅よりも大きかった。また、活動別では、ジョギングでは心拍数および代謝値に既存機との差異が目立ち、特に開発機で低値を示した。これは、ジョ

ギング走行のフォームが個人で異なることに起因する。ジョギングにおいて、腕を大きく振った場合と脇をしめて腕を固定した場合とでは、腕時計で計測される心拍数に差が生じる。これは、腕の大きな振りによる通常動作時の誤差を減らすために、一定以上の振動がみられた場合に内蔵されている制御機能が働くという、ストレス・カロリー計の性状によるものであり、ジョギング時に激しい腕の振りを示した場合、この制御機能が作動したと推察される。しかしながら、当制御機能は精神活動や歩行等の軽度身体活動における適正な測定には不可欠であることや、生活習慣病の予防や改善目的での厚労省の指針ではジョギングは推奨運動の一つであることが、当器での測定の機能上の限界と思われる。なお、予備試行として腕を布で固定して走行したところ、ある程度改善されたため、ジョギングでの使用の場合は腕のフォームを整えることで、ある程度の対応が可能であると思われる。

以上より、ストレス・カロリー計は、睡眠時間の客観評価や精神活動や軽度身体活動時の心拍数の変動と消費カロリーの計測が可能と考えられる。

５．今後の計画

本研究では、開発装置の精度比較をおこなうために若年者を対象とした実験を施行したが、当器は若年者の生活リズムおよびカロリーを測定する装置でもあるが、生活習慣病予防および治療の目的で使用が可能なモデルとして開発されたモデルでもある。今回、まずベースとなる心拍上昇を捉えるために、３分間の足踏み測定を実施し、これによる心拍変動を基盤として、身体活動時の心拍上昇を予測して計測に生かしたが、足踏み測定においては、実際に足の角度や足の運びにより、心拍変動すなわち身体活動負荷が大きく変わるため、当研究では足の角度、足運びのリズムをかなり厳密に統一して実験を実施した。しかし、当機が日常生活において利用されると仮定すると、足踏みを模範の通りに実施してもらい、そのうえでの測定は、かなり厳しいものがあると考える。したがって、実用性を考慮した場合は、測定者の年齢、性別、生活習慣病等の循環動態の状況により各種測定値およびエネルギー消費量の換算に利用する算術係数の設定が必要と考える。今後は対象者の層を拡大して対象者の状況に応じた測定がなされ、足踏み測定をしなくとも、対応できる算術係数の設定を検討する必要があると考える。

今後は、対象者を広げて実施を予定しており、本年は中高年や女子学生を対象とした、当装置の応用測定を予定している。なお、当研究の成果は 2014 年 7 月 12 日（土）：時間循環血圧研究会にて発表を予定している。