

複眼光学系を用いた立体内視鏡システム

山 田 憲 嗣

Three Dimensional Endoscopy Using Compound Optics

Kenji YAMADA

We have developed new type endoscope system using compound optics. Proposed system capitalized on peculiarity of compound optics. It has three-dimensional endoscope and multi wavelength band pass filter one. The system consists of micro-lens array, wavelength band pass filter, separation layer and image sensor. Several wavelength band pass filters are covered with micro-lens. This system makes it possible to take any images from the membrane surface to deep blood vessel simultaneously. With some test targets, the characteristics of this system are evaluated.

Key words: compound optics, endoscope, image processing, micro-lens

医療機器の進歩は著しく、多くの先進的工学技術により、さらなる発展が期待されている。その中でも、特に光学技術を中心とした内視鏡技術は、低侵襲な治療や診断が可能であることから急速に普及してきた。診断における内視鏡技術の進歩は、今から50年近く前の、長い管の先にカメラを取り付けた「胃カメラ」から始まる。その後の材料・通信工学の進歩により、ファイバーで光を伝送する「光ファイバースコープ」が開発され、現在使用されている内視鏡のほとんどは、デジタル映像を取得することができる「デジタル電子スコープ」へと発展してきた¹⁾。

近年では、色素内視鏡、拡大内視鏡や超音波内視鏡など、機能が充実したシステムが開発され、通常観察より多彩な内視鏡検査が可能になってきた。狭帯域の分光特性を利用して、通常画像では観察することが難しい病変の視認性や表面構造の観察を可能とした narrow band imaging (NBI) system も開発されてきた。これらの機能性を重視したシステムは、早期がんの発見・診断に有用であり、ますますの発展・開発が期待されている²⁾。

治療技術としては、1990年代には腹腔鏡下手術がはじまり、消化器外科、消化器内科、泌尿器科などを中心に多くの分野での手技が試みられ、国内外で広がりを見せてい

る。内視鏡手術は低侵襲で患者の身体的負担が少ないため、高齢者や回復力の弱い患者に効果があり、入院期間の短縮や医療費削減にも有効である。内視鏡手術は前立腺摘出手術や冠動脈バイパス手術など細かい操作が必要な症例においても実施され、その治療効果も上がっている。医療用内視鏡による手術は通常の外科手術と異なり、内視鏡の視野に映る像を頼りにメスなどの手術用具を操作する必要がある。例えば胆嚢を切除する手術などでは、何か所か小さく切開し、その穴から内視鏡や処置具を通して、周囲の血管やその他の組織を傷つけることなく目的の胆嚢を切除し、止血、縫合などの処置を行う。このような内視鏡手術の利点としては、手術痕が小さいことが挙げられる。また、術後の痛みが軽く、回復も早い。さらに、感染症にかかる危険性が小さく、呼吸器官の合併症も少なくなるという利点もある。最近では、この穴を1つにまとめて処置を行う単孔式腹腔鏡下手術 (single port surgery: SPS) の手技が急速に広がってきている。しかし、狭い孔から複数の装具を挿入しなければならないため、機器同士の干渉が起きやすいなどの問題もある。一方で、身体にもともとある孔から軟性内視鏡などを挿入し、管の壁に小さな孔をあけて体内の診断や治療を行う経管腔的 (けいかんくう

大阪大学大学院医学系研究科ロボティクス&デザイン看工融合(Panasonic)共同研究講座 (〒565-0871 吹田市山田丘 1-7)
E-mail: k-yamada@sahs.med.osaka-u.ac.jp

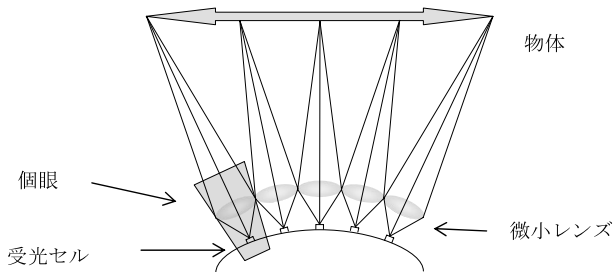


図1 複眼光学系（連立眼光学系）の側面図。

てき）内視鏡手術（natural orifice transluminal endoscopic surgery: NOTES）などが臨床現場で利用されている³⁻⁶⁾。

しかし、内視鏡手術は術中の視野が狭く、直接患部に触れることができないため、外科手術に比べて高度な技術と十分な熟練が要求される。従来の内視鏡は、単眼式であるため、対象を二次元画像としてしかとらえることができない。そのため、奥行き方向の深さなどの三次元情報を取得することができない。手術の熟練度にもよるが、奥行き方向の情報を知ることができないため、血管や腸管などを損傷してしまい、腹膜炎などの合併症を引き起こしてしまう可能性がある。これらの問題を解決するには、三次元情報を取得する必要がある。三次元情報を取得することで、病変の位置や形を正確に把握することができるため、従来の内視鏡よりも操作性が向上し、術者の技術的な負担の軽減にもつながる。さらに、患部の腫れ具合や管壁の腐食の盛り上がり具合などがどのような形状になっているかをその場で調べることができれば、病気の診断をより正確に行うことが可能となる。われわれは、超小型立体内視鏡システムの構築を目指し、昆虫などにみられる複眼光学系に着目した立体内視鏡システムの開発を行ってきた^{5,7,8)}。

1. 複眼光学系

昆虫などにみられるように、複眼は非常に小さなレンズが数万個集まった眼である。複眼光学系は、レンズの径が非常に小さく、焦点距離も短いという特徴をもつ。そのため、眼全体の容積が人間に比べて非常に小さくてすむ。空を飛ぶ昆虫の眼にとって、容積が小さく軽い構造の複眼は好都合だったのである。複眼光学系の特徴として、小型、軽量、広い視野が挙げられる。また、その構成も合理的であるため、工学の応用システムとしても多くの提案がある⁹⁻¹⁴⁾。図1に、トンボなどの昆虫にみられる複眼光学系の結像方式のひとつである連立眼光学系の断面模式図を示す。連立眼光学系では、レンズ1個に対し受光セル1個が対応している。また、個眼1つ1つのレンズが小さく、焦点距離が短いという特徴がある。つまり、連立眼光学系で

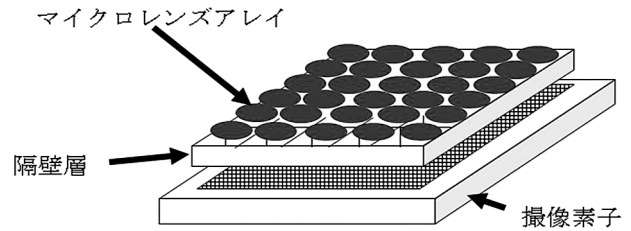


図2 TOMBO 概念図。

は、光学系の高密度化により、光学ヘッド部の薄型化が可能である。しかし、個眼あたり1点の情報しか得ることができないため、高解像度の画像を取得することが困難である。一方、複眼には、連立眼光学系と異なり、それぞれのレンズが複数の受光素子に対応した多眼視できるシステムもある。つまり、多眼視システムでは、コンパクトなシステムの構成は困難であるが、個眼あたりの情報量が多くなるため、高度な情報処理が可能となる。

2. Thin Observation Module by Bound Optics (TOMBO)

これら複眼光学系の特徴を検討すると、連立眼光学系を構成する個眼ごとに複数の受光素子に対応させる方式が考えられ、これら2つの方式の利点を併せもつシステムが期待される。

谷田らは、これらを具現化する画像入力システムとして、thin observation module by bound optics (TOMBO) を提案している¹²⁾。TOMBOの特徴として、光学系の薄型化によるシステムの薄型・軽量化、小口径のレンズを使用しているため近接撮影が可能であること、画像処理による柔軟な情報取得が挙げられる。TOMBOに用いられる複眼光学系では、単眼光学系に対し、微細レンズを使用するため焦点距離が短く、レンズ自体の厚さも薄いため、非常に薄い構成とすることが可能となる。また、レンズ径が小さいことから、光学系を最適化することで、近接撮影にも適している。さらに、複数枚の多角度からの映像を同時に取得可能なため、二次元画像処理のほか、三次元画像処理によるさまざまな応用が可能である。TOMBOの構成を図2に示す。TOMBOは複眼光学系として、マイクロレンズアレイ、隔壁層、イメージセンサーから構成される。レンズが微小なため、隣り合ったレンズからの光が入り、混信が生じる。そのため隔壁層を配置し、光の混信を防いでいる。

3. 複眼光学系を利用した内視鏡システム

3.1 立体内視鏡

近接撮影に特化した TOMBO の設計および製作を行っ

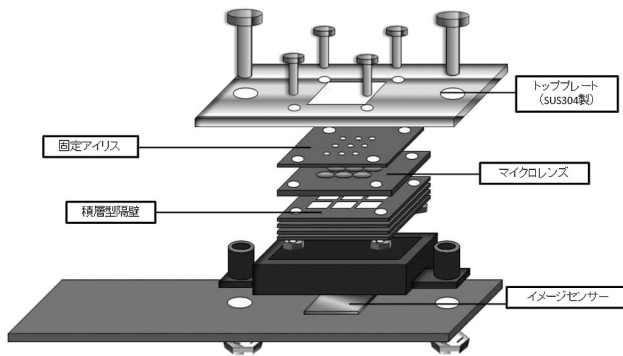


図3 試作システムの基本構造.

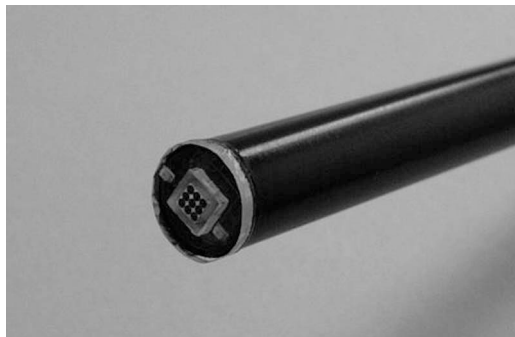


図4 試作システムの一例.

た. 図3に試作したシステムの基本構造を示す. イメージセンサーモジュールに, 連立眼光学系を取り付けるための設計を行った. 光学系の構造を吊り構造とした. 下部から, 信号分離隔壁, マイクロレンズアレイ, レンズスペーサーとなる. これらをトッププレートの下部に積層させ, 光学系を構成した. 積層型のレンズスペーサーの枚数を可変させることにより, フォーカシングを行うことが可能となっている. 隔壁については, 紫外線レーザーによる光造形法等により加工を行った. レンズアレイには, 非球面加工した直径1.0 mmのレンズを3×3に配列したものをを用いた. 図4に試作したシステムの一例を示す. 連立眼光学系取り付け後の厚さは, フォーカス等の調整により変化するが, 最厚部で約5.0 mmとなっており, 厚さの点からも近接撮影に適している. 試作システムを利用して, 内視鏡的粘膜下層剥離術によって切除された大腸ポリープを切除後, すぐに撮影した. 撮影した画像の一例を図5, 処理例を図6に示す. TOMBOは, 同時に位置シフトのある複数の映像を並列して入力することが可能である. 並列して入力される複数の位置シフト画像に対し, 撮影パラメータを用いた広視野化, 再構成型超解像処理による高解像度化の検討を行った. また, 三次元画像処理として, ステレオ法を拡張したマルチベースラインステレオ法(SSD)による組織の形状計測を行った. マルチベースラインステレオ

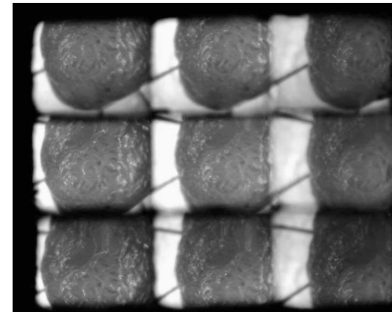
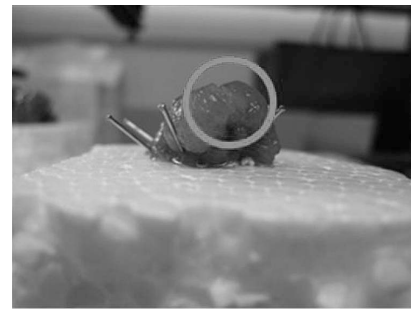


図5 取得した複眼画像(対象:大腸ポリープ).

立体形状

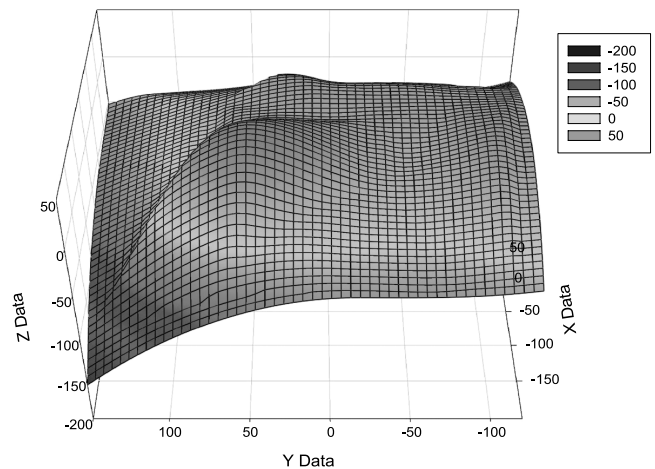


図6 三次元画像処理結果の例.

法により三次元形状計測を行う場合, 各個眼像間の各ピクセルにおける位置シフト量の検出を行う. SSDによるブロックマッチングアルゴリズムを用いることにより, 個眼像間の位置シフト量の検出を行った.

図7に, 三次元形状計測を行った固定幹細胞コロニーを撮影した複眼画像を示す. この画像はコロニーの周囲において培養液のみが存在する領域を撮影しており, 本来はこの領域に明確な対応点は存在しない. しかし, 取得された画像に対して三次元計測処理を行うと, 照明系や撮像素子の熱雑音等により, 本来存在しない対応点が検出される. これらは, 三次元計測を行う上で誤差の原因となるため, 画像に対し, 前処理を行った. 図8に, 三次元形状計測を

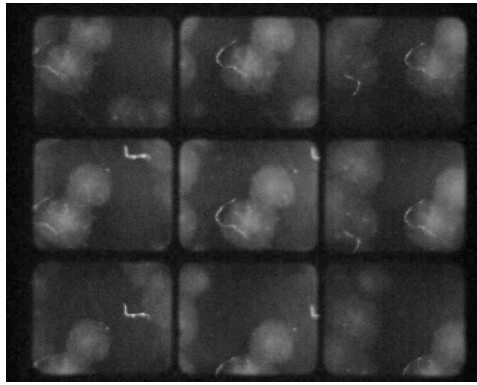


図7 複眼画像 (幹細胞コロニー).

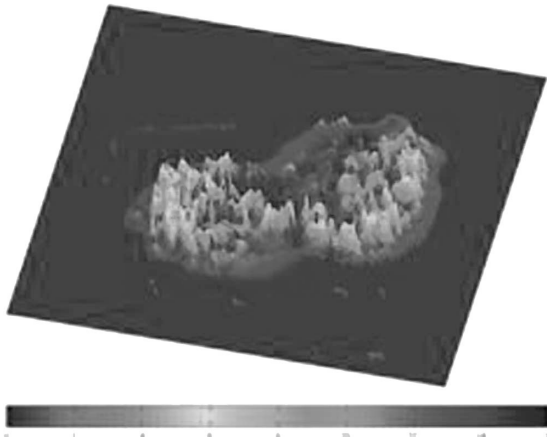


図8 三次元形状計測結果.

行った結果を示す。画像では、コロニーの形状のほか、レンズから対象までの距離を色で示している。実際の撮影距離約 11.0 mm に対し、大部分においてはグレーから濃い黒色であるため、距離を正しく計測できていると考えられる。しかし、図8左下のコロニー部における突起部(白い部分)は、実際の細胞が存在し得ない容器よりもレンズに近い位置に計測されており、誤差が大きい。誤差の原因として、撮像系の各個眼像間の撮影条件の誤差による取得画像の一樣性の低さが大きく影響し、三次元距離計測アルゴリズム内で行っているブロックマッチング処理のミスマッチが発生していることが挙げられる。また、近接撮影における照明系や照度むらの影響も考えられる。

3.2 マルチフィルター機能内視鏡

マルチフィルター内視鏡は、複眼光学系を用いた立体内視鏡技術を発展させ、生体組織の粘膜表層から深部血管の状況までをリアルタイムで、しかも同時に観察することを目標として検討している。複眼光学系の特徴は、複数の眼をもつことである。この複数の眼を最大限に生かすため、マイクロレンズアレイの各レンズに対して、異なる機能をもつフィルターを配置する。各レンズから得られる映像は

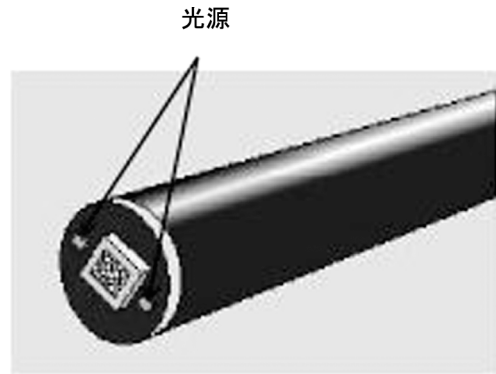


図9 波長帯域フィルター内蔵複眼内視鏡の概要.

波長が異なるため、波長が短いフィルターから得られる映像には生体組織粘膜表層の毛細血管が観察される。提案するシステムを用いることにより、内視鏡の挿入回数が1回ですみ、患者の負担が大幅に軽減されることが期待できる。また、同時に深部方向に複数枚の合焦点画像を得られることから、撮影瞬間の三次元合焦点画像を作成することが原理上可能となり、従来は組織を切り出して行う生理検査を行わずに診断できることが期待できる。

生体組織は、可視光領域(波長 400~780 nm)では、光学的には弱い吸収をもつとともに、強い散乱特性をもつ媒体である。したがって、生体組織に入射した光は生体内を拡散的に伝搬し、再び表面から射出した光のみが観察される。生体組織の散乱特性は、波長に強く依存していることが知られている。短波長の光ほど組織に深く進達せず、比較的表層近くの組織からの反射光として観察される。逆に、長波長の光は生体内部に深く伝搬する。なお、この領域で最も強い吸収を示すのは、血液中のヘモグロビンによる特異的な吸収特性(600 nm)である。600 nm を境にして、それより短い波長で急激に増加する。そのため可視光領域において、ヘモグロビンが存在する血管を認識することが可能となる。本研究では、この生体組織の波長依存性を内視鏡に利用する。異なる波長帯域フィルターを並列配置することにより、同時に深さ方向の異なる画像を取得できる。

図9に、複眼光学系を利用した波長帯域フィルター内蔵型複眼内視鏡の概要を示す。システムは、マイクロレンズアレイ、波長帯域フィルター、迷光遮断隔壁、および1台の撮像素子から構成される。マイクロレンズ1枚に対して複数の画素が対応するため、各レンズからの画像が1台の撮像素子上で結像する。また、図10に示すように、各レンズ1枚に対して波長帯域フィルターが設置される。このとき、三次元計測を可能にするため、対となるレンズには同じ波長帯域のフィルターを使用する。

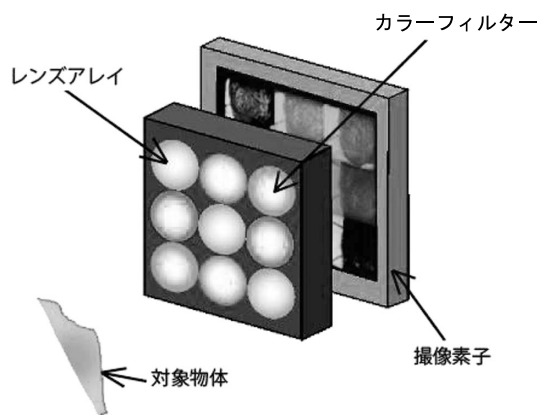
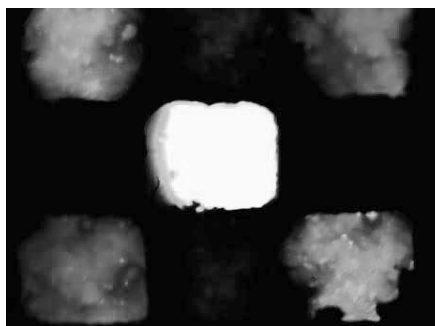
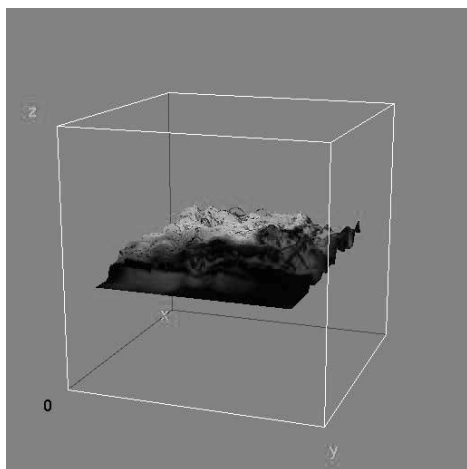


図 10 フィルター内蔵内視鏡のヘッド部。



(a)



(b)

図 11 波長帯域フィルター内蔵複眼内視鏡による画像と再構成画像。(a) 波長帯域フィルター付複眼内視鏡試作機の複眼画像、(b) (a)を深さ方向で再構成した三次元再構成画像。

図 11 に、本システムから得られる各レンズからの画像と生体組織の深さ方向に関する情報との概要図を示す。波長帯域フィルターが同じレンズ対から、三次元画像を再構築する。それを波長ごとに深さ方向に組み合わせて、粘膜などの表層から深部までの構造を再構築する。

複眼光学系を医療分野へ応用した例を示した。複眼光学系による対象物体を多方面から観察し、並列観察による処理の高速性の可能性を示した。今回示した応用は受動的な計測が主であったが、今後は、さまざまな物理的なエネルギーを一度に複数照射した場合の現象や、複数の薬剤を利用した場合の化学変化による病態や形態の変化について複眼的に検討を行う。

資料のご提供をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の谷田純教授、静岡大学の香川景一郎准教授、広島大学大学院の吉田成人先生に感謝いたします。

文 献

- 1) 田中雅夫監修：内視鏡—検査・治療・ケアがよくわかる本—(照林社、2004)。
- 2) 幕内博康ほか：特集 内視鏡ハイテク機器・先端技術、消化器内視鏡、**17**, No. 6 (2005)。
- 3) H. Mizuno, K. Gono and S. Takehara: "Narrow band imaging technique," *Tech. Gastrointest. Endosc.*, **5**, No. 2 (2003) 78-81.
- 4) 石田善敬ほか：特集 内視鏡外科手術をめぐる最近のトピックス、消化器外科、**34**, No. 1 (2011)。
- 5) 山田憲嗣：“複眼光学系を利用したカプセル型内視鏡の可能性”，*O plus E*, **33**, No. 5 (2011) 483-486.
- 6) T. H. Baron: "Natural orifice transluminal endoscopic surgery," *Br. J. Surg.*, **94** (2007) 1-2.
- 7) K. Yamada, H. Takahashi, S. Yoshida and T. Nagakura: "Three-dimensional endoscope by compound optics," *10th Polish-Japanese Seminar on New Trends in Biomedical and Clinical Engineering* (International Centre of Biocybernetics Polish Academy of Sciences, 2010) pp. 37-43.
- 8) 山田憲嗣：“生物に学ぶ複眼内視鏡”，*光技術コンタクト*, **48**, No. 4 (2010) 164-167.
- 9) S. Ogata, J. Ishida and T. Sasano: "Optical sensor array in an artificial compound eye," *Opt. Eng.*, **33** (1994) 3649-3655.
- 10) J. S. Sanders and C. E. Halford: "Design and analysis of apposition compound eye optical sensor," *Opt. Eng.*, **34** (1995) 222-235.
- 11) K. Hamanaka and H. Koshi: "An artificial compound eye using a microlens array and its application to scale-invariant processing," *Opt. Rev.*, **3** (1996) 264-268.
- 12) J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki and Y. Ichioka: "Thin observation module by bound optics (tombo), concept and experimental verification," *App. Opt.*, **40** (2000) 1806-1813.
- 13) K. Yamada, H. Mitsui, S. Yoshida, H. Takahashi and E. Shimizu: "Three dimensional measurement of cancer by compound eye system," *World Automation Congress (WAC) 2008* (Hawaii, 2008) pp. 1-4.
- 14) K. Tabata, H. Takahashi and K. Yamada: "Evaluation of multi-wavelength band-pass filter endoscope using compound eye optical system," *Proceedings of the 2009 Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC) '09* (Washington DC, 2009) pp. 286-289.

(2011年8月18日受理)