

氏名(本籍)	水谷哲也(三重県)
学位の種類	工学博士
学位記番号	博甲第550号
学位授与年月日	昭和63年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
審査研究科	工学研究科
学位論文題目	An analytical equivalence theory of programs with applications. (プログラムの解析的同値理論及びその応用)
主査	筑波大学教授 工学博士 森 正 武
副査	筑波大学教授 工学博士 五十嵐 滋
副査	筑波大学教授 理学博士 中 田 育 男

論 文 の 要 旨

本論文は ν -定義可能行為で表現された並行プログラム間の関係を解析的意味論により与え、プログラムと仕様との関係を論じたものである。

第1節は序論であり、本研究の意義ならびに梗概を示している。

第2節では本研究の基となる現代解析体系FAおよび ν -変換の概略を示している。 ν -変換(ν -conversion)は、現代解析体系FAの上でプログラムを ν -定義可能行為(ν -definable acts)で表現するものである。FAは古典論理LKの自然な拡張で、型の概念をもつ高階論理であり、実数および複素数の通常の解析学が展開されるものである。これは、理解しやすい透明なシステムになっているうえ、自然数論の保守的拡張(conservative extension)になっている。さらに、FAの上では様々なデータ構造を自然に表現できる。

ν -変換は、逐次プログラムの入出力関係についての検証が容易である上、並行プログラムの検証も厳密に行うことができる。特に、並行プログラムに関しては、 ν -定義可能行為の1つの解釈である永久解釈では時刻を全順序で表す為、論理的な並行プログラム系(時分割プロセス)と物理的に並行に動作しているプログラム系とを同一の方法で検証できる。

故に、永久解釈を用いることにより、並行プログラムのさまざまな場面でのふるまいを容易にかつ厳密に検証することができる。

第3節では、軌跡および軌跡の集合を定義し、軌跡の集合の関係について述べている。軌跡とは非負有理数の集合、即ち時刻の集合からデータの集合への関係として定義される。これらは ν -定義可能行為とは独立に定義されているが、軌跡は ν -定義可能行為に現れる変数列の動き、即

ち program の実行に関係する全ての変数の列の値の変化に対応する。

このとき、2つの軌跡の集合について、loci-morphism loci-contramorphism および equivalence なる関係を定義する。loci-morphism は一方の軌跡の集合に属する全ての軌跡に対して、それを模倣している軌跡が他方に存在するような関係である。loci-contramorphism も同様であるが、模倣の方法が異なり、前者は模倣されるほうの軌跡の時刻成分およびデータ成分を各々関数で変換した結果が模倣するほうの軌跡と一致し、後者は模倣するほうの軌跡の時刻成分およびデータ成分を各々関数で変換した結果が模倣されるほうの軌跡と一致する関係である。また equivalence は、双方の軌跡の時刻0および時刻無限大のときの値が一致する関係である。プログラムとの関係でいえば、equivalence が入出力の関係について論じた静的な同値性であるのに対し、loci-morphism および loci-contramorphism は言わば動的な同値性であると言える。

これらの関係についての数学的性質についても証明している。

第4節では第3節で述べた関係に基づいて ν -定義可能行為の間の関係を定義する。

ある ν -定義可能行為が他の ν -定義可能行為に loci-morphic, loci-contramorphic あるいは equivalent であるとは、永久解釈を用いて定義できる。特に、入力変数列、実行変数列、出力変数列の概念を導入することにより、loci-morphism と equivalence との関係について議論することができる。また loci-morphism の特別な場合として、loci-reducive および loci-synchronic を定義している。これらは各々実行変数列に関して変数の値の時刻毎の変形の変換が恒等、あるいは時刻の変換が恒等であるような関係である。これら特別な場合について、仕様の保存について議論している。

第5節では、loci-morphism ならびに equivalence のプログラムへの応用について述べている。

equivalence は2つのプログラムの入出力関係が一致していることを表す。即ち、あるプログラムを表している ν -定義可能行為Aがあるプログラムを表している ν -定義可能行為Bと equivalent であれば、注目している入力変数の値が実行開始時に変数毎に等しければ、それらの実行が終了したとき、注目している出力変数の値が実行終了時に変数毎に等しい。また loci-morphism は2つのプログラムの動作（変数の値の時刻による変化）の関係を表している。あるプログラムを表している ν -定義可能行為Aがあるプログラムを表している ν -定義可能行為Bに loci-morphic であれば、Bの変数の動作はAの変数の動作の模倣をしていることになる。逆に ν -定義可能行為Bの実行において、ある仕様Sが満たされているならば、 ν -定義可能行為A実行においても、変数の値の時刻毎の変換と、実行時刻の変換とを除いては仕様Sを満たしている。特に仕様Sが入出力関係および停止性の場合、変数の値の時刻毎の変換がある条件を満たすときSはAで満たされる。さらに ν -定義可能行為Aと ν -定義可能行為Bとが互いに loci-morphic であり、入出力関係を満たす条件を互いに満たすならばAとBは equivalent である。同様に ν -定義可能行為Aが ν -定義可能行為Bに loci-contramorphic であり、Bがある仕様Sが満たされているならば、Aの実行においても、変数の値の時刻毎の変換と、実行時刻の変換とを除いては仕様Sを満たしている。特に仕様Sが入出力関係および停止性の場合、変数の値の時刻毎の変換がある条件を満たすときS

はAで満たされる。特に停止性の場合、AがBに loci-contramorphic でありBが停止するのであれば他の条件なしにAは停止する。さらに ν -定義可能行為Aと ν -定義可能行為Bとが互いに loci-contramorphic であり、入出力関係を満たす条件を互いに満たすならばAとBは equivalent であり、またAがBに loci-morphic であり、BがAに loci-contramorphic であり入出力関係を満たす条件を互いに満たすならばAとBは equivalent である。

一方、行為Aが行為Bに loci-morphic であれば、プログラムの実行において「意味のある区間」、例えば1回のloopや1回の通信などに関して、AとBとの対応する軌跡の対応する区間でjによる変換を除いて入出力関係が一致している。逆に、プログラムの動作を「意味のある区間」で過不足なく分けられるとすると、その各々について部分的な loci-morphic が言えるような行為が存在すれば、その行為は元の行為に loci-morphic である。

第6節では、2種類の例について、loci-morphic などを用いて具体的に仕様の保存性について証明している。

第7節は結論であり、他の研究との比較および将来への発展について述べている。

審 査 の 要 旨

並行プログラム系の検証は、現在のプログラム理論の研究にとって最も大きな問題の1つとなっている。従来の手法が不完全、不明確あるいは厳密性の欠如などの欠点を持つのに対し、本論文は並行プログラムの検証を動的な同値性に帰着させ、それらの関係を数学的に厳密に定式化したことに意義がある。特に、動的な同値性からプログラムの仕様の保存性、さらには静的な同値性が導かれるという事実は、並行プログラムの検証にとって有意義なことと考えられる。

一方、本研究においては、プログラムの同値性（静的、動的共に）を導くための具体的な規則が与えられていない。逐次プログラムの場合と異なり、並行プログラムの一般形に対してそのような規則を見いだすことは困難かも知れないが、今後の研究の待たれる問題ではあろう。

よって、著者は工学博士の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。