氏名（本籍）	白銀哲也（千葉県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博乙第1,519号
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位論文題目	並行プログラム系の解析と検証の形式化
主査	筑波大学教授　工学博士　五十嵐滋
副査	筑波大学教授　Ph. D.　坂本直人
副査	筑波大学教授　理学博士　井田哲雄
副査	筑波大学教授　Ph. D.　田中二郎
副査	筑波大学助教授　理学博士　細野千春

論文の内容の要旨

本論文は，平行プログラム系の仕様記述および動作検証を遂行するための形式的体系としてtense arithmeticを提案すると共に実時間システムの検証について述べたものである。

本論文の基礎となるtense arithmeticは有理数論に基づいて検証を行なう形式的体系である。適当な有理数の理論 T°について，対象プログラムのラベル，プログラム変数，原始拍車を各々表す定数を付加して拡張したものを T°_{c}とする。原子拍車は，並行プロセスと1対1対応した，プロセススケジューラを一般化した概念である拍車（spur）を定義する基となるものである。拍車は時相論理におけるネクスト演算子“○”を並行プログラム系について厳密化したものと考えることもできる。T°のモデル $\mathcal{Q}$ を，付加した定数について自然に拡張して得られる T°_{c}のモデルを $\mathcal{M}$とする。軌跡（locus）と呼ぶ，時間 $t \in \mathcal{Q}$から T°_{c}のモデル $\mathcal{M}$への関数 χ を用いることで，時間によるプログラムの状態変化を形式的体系に取り入れる。対象プログラムの状態は階段関数的に変化する，すなわち，軌跡 χ は離散的に変化するものに限る。

論理変数への値の割当て ρ と軌跡 χ を定めればtense arithmeticの項（特に時間項と呼ぶ）は，観察時刻 $t \in \mathcal{Q}$によって時間値（$\in \mathcal{Q} + \{\infty\}$）として解釈される。時間項は本質的に T°_{c}の論理式 P を観察時刻以後それが最初に成立する時刻までの相対時間として解釈する P の立ち上がり（rise of P）$[P]$ および P の立ち上りの後の Q の立ち上がりを表す経過演算（futurity）$[P]$; $[Q]$ によって，定義される。この他に時間を表す本来の定数や論理変数も項であり，それらの間の時間的順序関係から時相的論理式を表現する。T°_{c}の論理式自体もtense arithmeticの論理式となる。

推論にはLKと同じ方法を用いる。推論規則としてはLKのものに加えて，経過演算による時間の推移に関する推論規則を取り入れ，公理系は立ち上がりおよび経過演算に関するものを中心に整備してある。有理数理論における定理は，Tense arithmeticにおいて証明図に始式として取り入れられる。これにより有理数理論の定理が導入可能となる。多くの時相論理的性質は，公理・推論規則を特別に用意せずとも，有理数理論上の定理に自然に帰着できることが多い。また有理数理論の体系は慣れ親しまれており，扱い易く，その上で推論を遂行することは，論理的に遂行する場合に比べて直観的に理解し易く，推論自体の検証も容易となる。

次に，tense arithmeticによる並行プログラム系の検証について示している。まず検証対象となるプログラムを構成する並行プロセスの各ステップの実行を，プログラム公理と呼ぶ論理式として，次の実行ステップへの遷移を制御する拍車を媒介に定式化する。その上で拍車の駆動する系列をグラフオートマンの入力と見なし，更に

各実行ステップに実行時間の上限や下限を割り当て，動作を解析する。これはタイミングチャート，状態遷移図を用いた従来の手法を厳密化した手法であるため，それらの知見を取り入れることができる。また，拍車によって計算実行列（computation sequence）をインデックス付け，可能な計算実行列の技刈りを容易にする。拍車の駆動する系列によって，システム全体の挙動（各構成プロセスのそれと比べて複雑でありしばしば理解が困難）についての場合分けが容易であり，例えば到達可能な状態と不可能な状態の判別に有効である。さらに実行時間の幅の伝播の表現・解析が容易である。

以上により，プロセスのスケジューラの一般化概念「拍車」が有理数論上で無理なく表現され，時相論理では不自然な形で扱われていた並行プログラムが自然な形で扱えるようになった。実行時間を含む証明では，例題としてDekkerの解の飢餓回避問題を取り上げ，実行時間に関する制約が増えるため可能な条件分岐が少なくなることで証明が簡単になることが多いことを確認するとともに，T字路における自動車の合流制御プログラムを，チェックプログラムを用いて解析検証した。さらに自動伴奏システムの制御問題についてもtense arithmeticで検証を行なうための指針を示している。

審 査 の 結 果 の 要 旨

本論文は，実時間並行プログラムの形式的な表現とその論理的検証の研究として，従来の時相論理や期間カリキュラス等との比較や具体例の取り扱いについての記述に物足りない点はあるものの，体系は洗練されていて構造が透明であり，理理的基礎として評価できる。

よって，著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。