

## 任意形状位置概念をもちいたエージェント行動規則表現

西野 順 二<sup>†1</sup> 西野 哲 朗<sup>†1</sup>

サッカーロボットなど知的な自律エージェントを構築にあたっては、意志・運動モデルの逆問題を解く、学習を行う、人の持つ知識モデルを利用するなどの方法がある。協調が必要なサッカーロボットでは、自身の位置やチームメイトの位置が行動の前提条件として重要である。本研究で提案するのは、人の持つ「このへん」という位置に関するあいまいな知識をもとにした行動の意思決定システムとそのモデルである。あいまいで任意形状の位置概念をファジィ集合を用いて表現し行動の選択をファジィ推論をもちいて行うことで、人の持つあいまいな位置概念を取り込むシステムを構築した。このような位置指定表現は新規性が高く他に類をみない。人の知識と親和性も高い。その記述能力と計算原理についての議論と実システムの使用評価実験の結果から、本モデルの有効性を示す。

知的エージェントの構築において、このへんというあいまいな位置概念とそこでの行動を指定する意思決定モデルを提案し、その効果をサッカーロボット構築実験を通じて示す。

### Fuzzy geometric description for agent behavior control rules

JUNJI NISHINO<sup>†1</sup> and TETSURO NISHINO<sup>†1</sup>

In this paper, we propose an agent control rule description system that uses polygonal region images on the problem space. When these control rules are applied to soccer robots the region is equal to a several linguistic notion of geometric area such as 'corner', 'in front of the goal' and etc. We use fuzzy set to describe that area to include fuzzyness of the linguistic expression. Here we describe a definition of proposed method, calculation algorithms and experimental results to show effectiveness of method.

<sup>†1</sup> 電気通信大学

University of Electro Communications

### 1. はじめに

数値的に表現可能な問題の解決およびモデリングとは、問題空間における制約や目的関数にしたがって最適解や関係写像を求めることと言える。このとき制約や目的が線形であれば、線形システム論の手法で解を求め、また非線形であれば二次関数や凸関数、単調関数などそれぞれのクラスに応じた解法が研究、応用されている。問題の状態空間自体の次元の高さや多様体としての構造の複雑さなどに応じて、非ホロノミックシステムへの対応技法などが同様に研究、応用されている。これらの手法は状態空間から操作あるいは解への写像を求めることにほかならない。

いっぽう我々、人がこうした問題に直面したときにも、空間の構造をとらえ、それに応じた行動や解を求めている。その表現や解決過程は、問題解決手法で用いているような厳密な解析的手法ではなく、直感にもとづいた、空間の分割と、ヒューリスティックな対応により、状態空間と操作や解への写像を構成していると考えられる。たとえば、サッカーロボットの行動モデルを構築するとき、「ゴール前ではシュートする」といういっけん簡単かつ常識的な表現が、そのまま問題解決のための写像として思考内で利用されている。実際プログラムで書くときには、プログラマ自身がこれを表現しようとしている。

### 2. 任意形状領域による意図表現

パラメータ空間や実空間を問わず、何らかの方法で人間が認知可能な空間に対して、解が分布しているような問題では、人のヒューリスティックを用いて対処することが期待できる。

たとえば、サッカーロボットに求める行動は、プレイヤーの配置が所定の位置になったとき、それに合わせて決定される。すなわち、ゴール前で、ボールを持ったロボットが、キーパーと一対一で対峙したときには、シュートを試す、と言った戦術表現である。この「ゴール前」という位置概念の実体は、表現をした個人のうちにあり直感的かつ非定常なもので、あいまいさを持っていると考えられ、厳密な方式での表現は不可能である。

これまでのシステム開発では、このような形状にこめられた意図をシステム制作者が、ヒアリングなどを通して解釈、分解し、プログラムとして実装可能な形にブレイクダウンしていた。

この人手による解釈プロセスを省くことで、システム構築自体の効率化に加え、修正や調整のフィードバックが直接的に可能となることで、よりの確な対応ができると期待される。

こうした、任意形状による位置や領域の表現を問題解決に用いることは、これまでほとん

ど例がみられない。コンピュータシステムとして、任意形状領域を使用するものとしては、グラフィック描画のためのものがほとんどである。たとえば、2次元の任意形状を指定し、3次元画像を生成する研究<sup>1)</sup>がある。これらは、あくまで任意の形状を描画することが主題であり、形状にこめられた意図を解釈し、利用する立場とは異なっている。

この点で本研究の独自性がある。

### 3. 計算アルゴリズム

2次元上のファジィ推論の実装である「このへんファジィ推論」<sup>2),3)</sup>は、フィールドなどの位置に基づいた直観的な行動規則を表現するシステムである。2次元の実空間を、このへんで、という位置に関する状態分割を行い、ファジィ推論エンジンを介して解釈・実行を行う。

本論文では、エージェント行動を表現するための位置表現エディタを構築したうえで、この推論エンジンを利用して行動を実現した。

#### 3.1 位置表現の数値化

本論文で扱う任意形状の位置表現を以下で述べるファジィ集合に変換することを考える。

まず、任意形状が自由な曲線であったとすると、その表現のためのパラメータ数に限りがなく実質的に表現不能となる。そこで、本研究ではいくつかの直線で構成され凹を認められた閉多角形  $P$  で表現されたとした。ユーザはこの多角形を複数指定することとなる。

対象として2次元ユークリッド空間  $R^2$  上に、多角形の  $M$  個の頂点  $V_i \in \{1 \dots M\}$  が与えられたとき、相隣り合う2点ずつの組み  $(V_i, V_{i+1})$  を両端とした線分を  $L_i$  とする。ただし、 $L_M$  は  $(V_M, V_1)$  を両端とする。この  $R^2$  の上に  $P$  で定義された部分領域を表すファジィ集合があるとみなす。

空間  $R^2$  からファジィ集合の適合度  $g$  への関数  $\mu_P(x, y)$  を、 $(x, y, g)$  のもと次のように定めよう。各線分  $L_i$  を通り直行する傾きが1となる平面  $g = S_i(x, y)$  を構成する。ある点  $(x, y)$  の基礎適合度  $g(x, y)$  を次の式 (1) で定める

$$g(x, y) = \min_{i=1 \dots M} (S_i(x, y)) \quad (1)$$

つまり、各線から座標平面に対して45度の斜面で構成する山を作ることとなる。

この方法では最高点の値が決まらず、1を下回ったり大幅に上回ることもあるため、実際のファジィ集合の適合度の条件である  $[0, 1]$  の区間に値を基準化する。応用におうじて、シグモイド関数法、0と1によるカットオフ、 $\mu(x, y) = \max(0, \min(1, g(x, y)))$  などがある。

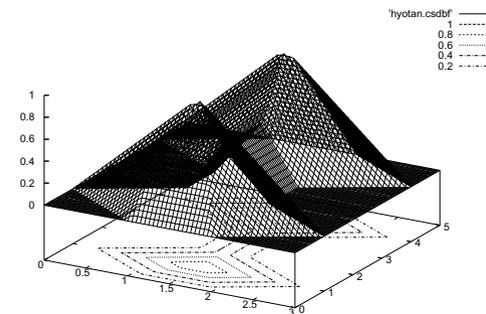


図1 複雑なアウトラインを持ったファジィ領域

#### 3.2 このへんファジィ推論システム

このへんファジィ推論による意志決定は、並列に列記された規則群からなる推論方式であり、規則の条件部には状態を変数とするファジィ命題を用いる。本システムでは「右サイド」「ゴール前」「自分の近く」など、サッカーフィールド上の物理的な位置の曖昧な領域をファジィ集合で表現し、「ゴール前ならシュートする」と言った直観的な行動規則を扱えるようにしている。

2次元上のファジィ集合を用いることにより、ある対象物  $A$  の位置が  $p=(x, y)$  の座標で与えられるとき、位置を表す2次元上のファジィ集合  $G$  に対して、 $\mu_G(p)$  と単一の演算で表すことができる。従来のファジィ推論で用いられてきた手法では、条件部のファジィ集合として1次元上の集合の直積を用いていた。このため2次元上で見ると長方形領域のみしか表現できず、くの字形など凹凸のある領域は複数の長方形ファジィ領域の和として表現せざるおえなかった。本提案手法では「このあたり」という曖昧な2次元領域をそのまま2次元上の単一のファジィ集合により図上で指定できる。このため、より直観にあった位置条件命題の設定を可能としている。

また、これらのあいまいな領域はビジュアルエディタを用いてユーザによって直観的に定義される。エディタ上で領域のアウトラインを指定すると、そのアウトラインをもとにファジィ集合化される。凹凸部のある複雑なアウトラインを持ったファジィ集合の例を図1に示す。

### 3.3 推論原理

このへんファジィ推論は、ファジィ命題をもちいた並列発火型の規則ベース推論である。規則は以下の形式である。

$$R_i : \text{if } obj_i \text{ is } \tilde{A}_i \text{ then Do } Act_i \quad (2)$$

条件部の  $obj_i \text{ is } \tilde{A}_i$  は2次元空間上のファジィ命題であり、具体的にはサッカーフィールド上の「このへん」という、主観的かつ直観的に定められたあるあいまいな領域  $\tilde{A}_i$  に、ある対象物  $obj$  が入っているかどうかの度合いを示す。この度合いはファジィ真理値  $[0, 1]$  の値を介して求める事ができる。

対象  $obj$  は、状態変数  $(X_1 X_2 \dots X_{22} B)$  のうちの一部であり、たとえば ball ならば  $B = (B_x B_y) \in R^2$  の2変数を指す。あいまいな領域  $\tilde{A}$  への適合度  $g$  は、2次元上のファジィ集合  $\tilde{A}$  のメンバーシップ関数  $\mu_{\tilde{A}}$  によって求まる。

$$g = \mu_{\tilde{A}}(X), X \in R^2 \quad (3)$$

推論結果の行動  $Act_i$  はあらかじめ定義された基礎動作へのシンボルである。

### 3.4 推論結果の統合

このへんファジィ推論は、並列発火による推論を行う。ファジィ推論では、与えられた状態に対して、複数の規則がそれぞれ  $g_i \in [1, 0]$  の範囲の重みを持って適合する。結果の統合は各推論規則  $R_i$  の適合度  $g_i$  をもとに行う。本研究のシステムでは、最大適合度を与える規則の行動を採択する。

$$Result = \{Act_j | g_j = \max_i(g_i)\} \quad (4)$$

適合度が同じ場合の競合解消は、規則番号の小さいものをとることとした。

この他の統合手法としては、適合度に応じた確率的に1つ選択、閾値以上のうちから1つ選択、適合度に応じた混合などがある。これらの実行方法についてはファジィアルゴリズム<sup>4),5)</sup>において定式化されている。

### 3.5 任意形状の位置概念にもとづく規則の表現能力

このへんファジィによる位置に基づくファジィ推論は、記憶を持たないエージェントの任意行動規則を表現可能である。

記憶を持たないエージェントの行動規則は、すなわち、現在の状態  $s$  に対して行動  $Act$  を割り当てる任意の写像  $\pi : S \mapsto A$  である。

いっぽう、このへんファジィ集合を適当な大きさの範囲で多数作成し、それぞれのメンバーシップ関数が互いに重なる境界を調整することで、任意の規則適合度  $0 < e < 1$  を閾

値として、状態空間  $S$  全体を細分化した状態  $\tilde{s}_i$  の有限な集合和で表現することができる。

$$S = \bigcup (\tilde{s}_i) \quad (5)$$

ここですべての細分化した状態  $\tilde{s}_i$  ごとに行動  $Act_i$  を割り付ける規則

$$R_i : \text{if } s \text{ is } \tilde{s}_i \text{ then Do } Act_i \quad (6)$$

を作れば任意の行動規則を表現する写像となる。

### 3.6 像による規則数縮約と構造の特定

細分化した状態  $\bigcup (s_i) = S$  にもとづいて、作られた完全表現規則群があるとし、このとき後件部の行動  $Act_j \in A$  は有限で  $m$  個とする。これは条件から後件部への写像とみたときの像である。ここで、規則群を行動の添字ごとに集めた規則集合  $R_j = \{R_i | Act_i = Act_j\}$  を行動の数だけ作ることができる。すると各規則の条件部のファジィ命題のファジィ集合を統合できる。

$$\tilde{A}_{sum_j} = \bigcup_{R_i \in R_j} \tilde{A}_i \quad (7)$$

ここで演算  $\cup$  はファジィでの集合和である。

完全表現した規則群を行動ごとに統合することで、 $m$  個の規則で表現できる。

$$R_i : \text{if state is } \tilde{A}_{sum_i} \text{ then do } Act_i (1 \leq i \leq m) \quad (8)$$

こうして細分領域を統合した部分領域は、一般に矩形や円形とは異なった任意の形状であり、その形状自体が一定の意味をもつことになる。すなわち、同じ行動をすべき状態であることを意味する。

このとき統合された複数の領域で分割された状態空間は、その分割自体が問題の構造のある面を表現していると言える。

実際の規則構築にあたっては、この統合された領域に近いものをユーザが指定し、行動をみながら修正することで、大局から微細な境界を特定してゆくプロセスをたどると考えられる。

## 4. OZED システム

2次元ファジィ集合を用いたエージェント作成システム OZED キットは、バーチャルサッカーシステム一式、エージェント編集システム、このへんファジィ推論エンジンをまとめたサッカーシミュレーションの入門キットである<sup>6)</sup>。ここでは、エージェント編集における任意形状による意図指定の利用に焦点をあてて説明する。

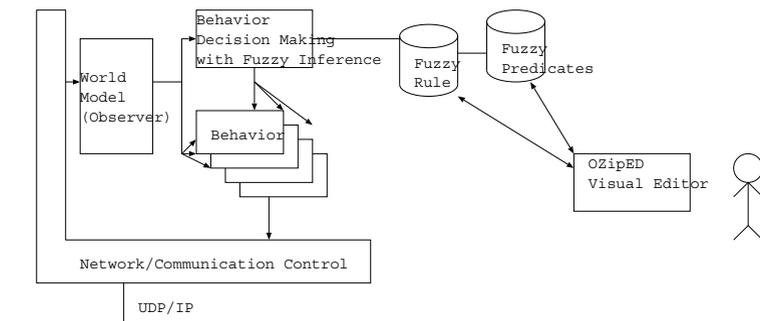


図 2 OZED システム (実行部分)

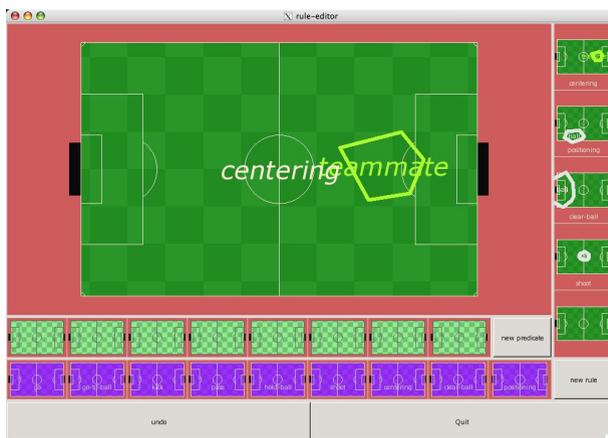


図 3 ビジュアルルールエディタ

#### 4.1 ビジュアルルールエディタ

ビジュアルルールエディタは、グラフィカルに表示されたサッカーフィールド上に、「このへん」という位置を直接記述するエディタである。ユーザインタフェースであるビジュアルエディタの動作のスナップショットを図3に示す。

ここで指定したアウトラインは、内部の2次元ファジィ化処理によってフィールド上のファジィ集合として格納され、このへんファジィエンジンによる行動推論部で用いられる。

行動規則は2次元ファジィ集合を前件部とし、出力である後見部には4.2節に示す基礎動作を割り当てることができる。

#### 4.2 組み込み基礎動作

現在までに OZED で提供する基礎動作は次の通りである。

- gotoball: ボールを発見しその方向へ走る。
- shoot: ゴールの方向へキックを行う。
- centering: ゴール前のチームメイトへパスを行う。
- clearball: ボールに近付き直近の空いたサイドライン側へボールをキックする。
- holdball: 直近の相手プレイヤーと反対の側へボールを小さくキックし移動しつづける。
- positioning: 設定されたゾーンに戻る。
- go(x): フィールド上の点 x へ走る。
- kick(x): フィールド上の点 x へキックする。

#### 4.3 このへんファジィの特長

このへんファジィによる行動規則表現は、原理上、任意の記憶を持たないエージェントの行動則を表現できることを3.5節で示した。あわせて、ファジィ規則の並列発火および実行の方式に起因する統合可能という性質から、行動によって規則を縮約することができることも示した。実用上は、時間的制約により多数の規則による表現は現実的とは言えないが、2次元自由形状を使えることによる表現能力によりその短所を補うことができる。

このへんファジィでは二つの意味で直観的な行動制御の構築ができる。第一は直観的な領域イメージに対する行動の割付による、単一規則の直観的な作成である。もう一つは、ファジィ推論規則の追加が容易に行えることを利用した、規則群の編集である。

たとえば、サッカーで得点に結び付くゴールそばでのシュート行動は、位置によるタイミングが重要である。このへんファジィとビジュアルエディタを用いることにより、直接的に位置を指定することができ規則の作成効率が高い。さらに、作成した規則の変更を行う場合にも、すこし狭く、すこし広くなどの、ユーザの観察にもとづいた直観的な変更要望を、そのままエディタ上で実現することができ、直観的な修正を行うことを可能としている。

もう一点の規則群の構築・編集が追加的に行えることで直観的な変更が可能となっている。ある時点までに作った規則群での行動を観察し足りない規則が明らかになれば、それまでの規則はそのままに、必要な規則を単に追加すれば良い。このとき、追加した前件部の位置にもとづく命題の適合度が、以前の規則の適合度より高くなるようにすることで、新たな行動をオーバーラップして実行できる。たとえば、前件部を全域とし後件部を gotoball(ボー

ルへ移動)とした規則一つで、つねにボールに向かう行動が実現できる。この基本特性の上に、前件部をゴール前領域とし後件部を shoot(ゴールへシュート)とする規則を追加すれば、通常はボールへ向かいシュートチャンスにはシュートするサッカーロボットとなる。さらに仲間の位置に応じたパス行動など、累積的に行動規則の構築ができる特長がある。

前件部の表現能力の高さにより比較的少ない規則数で行動が実現できている。OZED キットのサンプルとして掲げたエージェント7種類は、それぞれ1, 6, 5, 2, 7, 4, 4本の規則で構成されている。最大7規則、平均4規則で、FW や MF としてのポジショニングや行動を行えることを示している。

## 5. エージェント行動規則による表現と実行実験

位置に関する情報にもとづき行動を決定する実験として、指定した軌道を巡回するエージェントの構築を、本システムを用いて行った。実験は、複雑なコースをたどることを目標として、本システムを初めて利用する学生が規則を作成するタスクによっておこなった。

### 5.1 非定型軌道の追従行動規則

実験の行動目標として図4に示す軌道をあたえ、これを見た学生被験者が、OZED システムを用いて行動規則を構築するときの、構築に要した時間、実際に構築した規則を記録した。

実験の指示として、規則作成前には、本システムの考え方を3分間説明し、エディタ操作のうち、領域指定の方法、対象オブジェクトの指定法、規則の追加法、保存と動作確認、既存規則の修正法を示した。

構築の結果、規則の構築の所要時間は20分間で、実際に構築された規則を図5~10に示す。図中の多角形がその規則の条件部であり、そのなかにエージェント自体 (self) が来た時に行動 (go) を行う。行動 go の目的位置は、各図中の小円である。

構築にあたっての感想として以下のものがあげられた。

- (1) 何度か試行錯誤した
- (2) 当初は難しく感じたがすぐに慣れ、慣れると分かりやすいと感じた
- (3) (C言語など)プログラムで同様に表現するのは困難だと思う
- (4) 指定領域が実際に示す広さを理解するまで時間がかかった

結果から、ロボット等のエージェント行動決定規則を作るにあたり、本システムの任意形状位置概念表現できる機能が有効であったと言える。感想にあるように、じっさいに同様な判断をするプログラムコードを記述する負担は大きい。



図4 目標軌道

試行錯誤によって行動規則の改良度合いを追いかけることで、本システムの意義が幾何的な条件記述を助けるシステムにとどまらず、そもそも行動の方針をつくることを助けていることが分かった。規則を制作するユーザ自身が、任意形状それ自体に意味をもたせているためと考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、任意形状による位置概念を計算機的に表現し、問題解決および意思決定に利用する手法を提案した。本手法は任意形状の位置的な情報を利用する実用的な知識構築という点で、他に類を見ない手法である。これを自律エージェントの行動規則に適用し、その有用性を明らかにした。また、OZED と呼ぶサッカーエージェント作成ツールに導入することで、実用的なシステムが実現できた。多角形による領域選択によりユーザの持つ知識と親和性の良い表現ができた。またアウトライン記述を元に領域を特性づけるアルゴリズムと、その境界にあいまいさを儲けることで、より直感的なインターフェースとなった。

空間の、ある部分領域に対して何らかの意味付けをして理解を助けるという行動は、人間が日常の問題に対しても行っている知的行動の一つである。この空間は、必ずしも可視的・可操作な空間にとどまらず、なんらかのパラメータ空間であることも多い。

本手法はこうした非可視的な空間においても有効であると考えられ、部分的にはヒューマノイド制御などに応用可能であることが、関連の研究から期待できる。

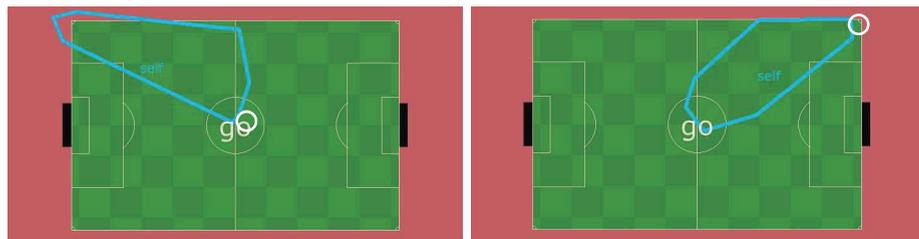


図 5 規則 1

図 6 規則 2

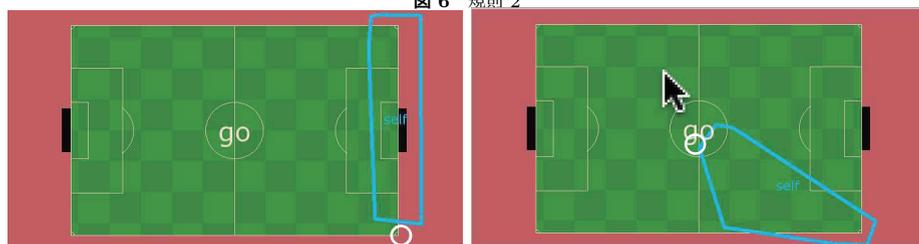


図 7 規則 3

図 8 規則 4

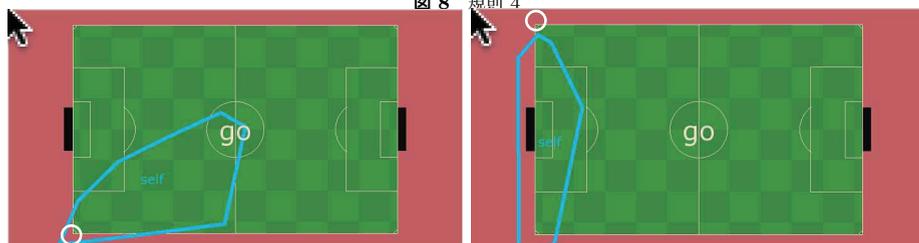


図 9 規則 5

図 10 規則 6

## 参 考 文 献

- 1) Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, H. T.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, *ACM SIGGRAPH 99*, (August, 1999.).
- 2) 西野順二：このへんファジィ制御，第 23 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp.98-101 (2007).
- 3) 西野順二：このへんファジィとそのあたり，知能と情報， Vol.20, No.5, pp.776-784

(2008).

- 4) Zadeh, L. A.: *Fuzzy Algorithms, Information and Control*, Vol. 12, pp.94-102 (1968).
- 5) Tanaka, K. and Mizumoto, M.: *Fuzzy Programs and Their Execution, Fuzzy Sets and Their Applications to Cognitive and Decision Processes (etc., L. A.Z., ed.)*, New York US., Academic Press, pp.41-76 (1975).
- 6) 西野順二，久保長徳，下羅弘樹，中島智晴：ロボカップサッカーシミュレーションエージェント開発体験キット OZED，第 4 7 回プログラミングシンポジウム報告集，プログラミングシンポジウム委員会，情報処理学会，pp.79-86 (2006).