

人が知覚している足部位置と実際の足部位置との誤差の特性

Feature of the Errors between the Perceived Toe Position and Actual Toe Position

○長尾 裕太 (早稲田大学), 小林 吉之 (産業技術総合研究所), 藤本 浩志 (早稲田大学)

Yuta NAGAO, Waseda University

Yoshiyuki KOBAYASHI, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Hiroshi FUJIMOTO, Waseda University

Abstract: To determine the effects of aging on the accuracy of perceived foot position, we conducted following experiment to 10 elderly and 10 young participants. Participants were asked to adjust the position of the target line as close as possible to either most medial or most lateral parts of their foot, while they wore a modified cape that obscured their view of their feet. Once they felt that target line was appropriately placed along the foot, the distance between the line and the foot was measured. No age-related differences were identified when they were asked to place the line along with the most lateral part of their foot. Both age groups tended to place the line 10-20 mm over the foot. However, the elderly displayed smaller errors than young when they were asked to place the line along with the most medial part of their foot. We also discussed the possible reasons that explain these features in the article.

Key Words: Biomechanics, Bio-Motion, Position Sense, Human Engineering, Measurement

1. 緒言

転倒は、すべての年代の人にとって減少させたい日常生活での事故である。特に高齢者にとっては、時には死亡要因にもなることから、超高齢社会を迎えた我が国にとっては危急の対策を要する課題である。人が転倒する最も主要な要因については、実際に転倒を経験した者に対するヒアリングやアンケート調査によって、歩行中のつまずきであることが報告されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。また、この結果は海外の調査でも同様であることから⁽⁴⁾、人が歩行中につまずき要因を明らかにできれば、我が国だけでなく世界中で展開できる転倒予防策を検討することができると考えられる。

つまずきは、歩行中遊脚期に足部が地面もしくは何らかの障害物と接触することで転倒のきっかけとなる現象である。著者らの研究グループはこれまで、人が歩行中につまずき要因の一つとして考えられる、「知覚している足部の位置と実際の足部の位置との誤差」に着目してきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。人は、自分の身体各部位の位置や姿勢を目視することなく知覚することができる。これは歩行中も同様で、例えば障害物を乗り越える際には逐一足部の位置を視認しなくても、一定量の足部のクリアランスを確保することができる。このような調整は我々が持つ体性感覚（例えば関節角度に関する知覚：joint position sense など）によるものと知られているが、その一方でこの感覚の精度は十分に高いとは言えず、恒常的な誤差があることも報告されている⁽⁸⁾。そこで先行研究では、若年者を対象に水平方向（前後及び内外）の知覚誤差の特徴を定量的に評価した。その結果、上記の仮説の通り 20~40mm 程度もの恒常的な知覚誤差が内外方向に確認され、実際の障害物乗り越え動作の際に確認された特徴⁽⁹⁾との整合性も認められた。

しかしこれまでの研究^{(5),(6),(9)}で対象とされてきたのは若年者のみで、歩行中のつまずき及びそれに伴う転倒がより深刻な事態になりやすい高齢者については評価されてこなかった。そこで本研究では高齢者を対象に、これまでの研究でつまずきの要因になりえると考えられた内外方向の知覚誤差について、定量的な評価を行うことを目的とする。この研究の結果、高齢者の足部知覚特性が明らかになれば、今後よりつまずきにくい環境、もしくは歩行をよりつまずきにくく補正する器具を検討・開発する際の手がかりにな

ると考えている。

2. 方法

2-1 被験者

65歳~75歳の高齢者10名（平均年齢70.1歳、標準偏差3.57）及び20代の若年者10名（平均年齢22歳、標準偏差0.82）が本研究の被験者として実験に参加した。実験前被験者には、下肢における過去の外傷歴、疾病歴について確認を行い、日常の歩行動作及び安全な実験の実施に影響する要因がないことを確認した。

2-2 知覚している足部位置の評価方法

先行研究では、レーザ墨出し器で表示された直線（以下基準線と記す；クラス 1M, 635nm の可視光）に、足もとを見ずに体性感覚だけで指定された足部の部位を合わせさせることで知覚している足部位置を示させ、それと実際の足部との誤差を計測することで知覚誤差の傾向を評価した。この実験ではレーザ墨出し器は床に固定され、指定されている足部の部位がレーザ上に位置されるように被験者自らが足の位置を調整した。しかしこの手法では、指定された足部の位置を微調整する際に片足立ちになる場合があり、この時にバランスを崩す高齢者がいることが懸念された。そこで本研究では、床に固定された基準線に足を合わせるのではなく、静止立位状態の足部に基準線を合わせることで知覚されている足部位置を示させ、それと実際の足部との誤差を計測することで知覚誤差の傾向を評価することとした。但しこの場合には、得られた結果について先行研究で確認された若年者の結果と単純に比較できなくなることも考えられたため、本研究では高齢者だけでなく、若年者に対しても再度計測を行った。

2-3 実験器材

基準線には、被験者の足に掛っても触覚的な手掛かりにならない点を重視し、先行研究と同様にレーザ墨出し機（YAMASHIN レーザモバイル LM-METAL）を用いた。レーザ墨出し器は、THK 社製のガイドレール（THK FBW3590XR+550L）のスライダ上に固定し、スライダに結び付けた位置調整用のビニール紐を被験者自らが引くことで、自由に基準線の位置を調整できるようにした。このガイドレールは、スライダが被験者の前顔面と平行に移動す

Participants wore a cape during the experiment in order to hide the view around the foot.

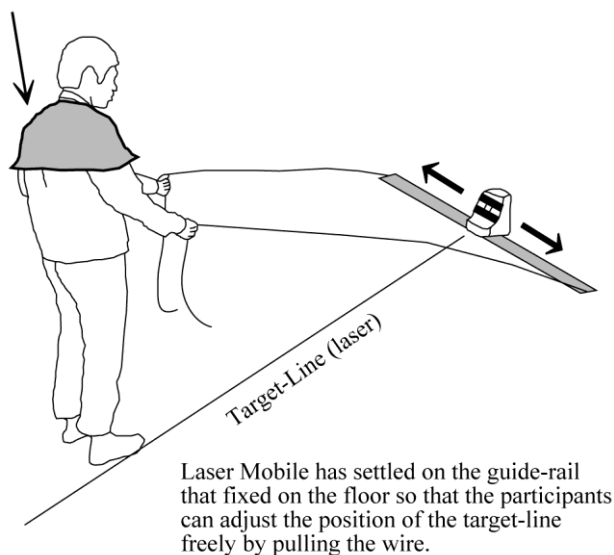


Fig.1 Schematic diagram of the experimental setups

るように被験者の3m前方の床面に設置し、スライダ上のレーザ墨出し器は、基準線が被験者の矢状面と平行に表示されるよう固定した。なおレールの長さは550mmであり、被験者の正中線を中心に左右に均等な長さとなるように設置した(図1)。

実験は8mほどの歩行が可能であり、床面には視覚的な特徴が無い十分に広い実験室内で行われた。更に被験者が立つ位置には、ラミネート加工したA0サイズの方眼紙を長辺が基準線と平行になるように設置し、被験者はその上で実験を行うことで各試行における知覚している足部位置の記録に用いた。なお方眼紙の罫線は1mm間隔、基準線の太さは約1.5mmであり、基準線の中心部から実際の足部の縁までの距離を目視で記録したため、計測の精度は1mm程度である。

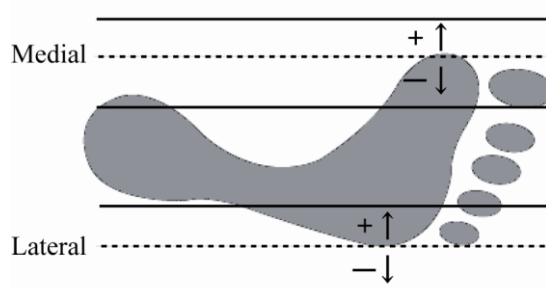
実験で知覚している足部位置を計測するためには、被験者が実験中に足元を見ることで生じる足部位置の視覚的なフィードバックを防ぐ必要がある。そこで実験中、被験者には不透明なビニール製のケープを着用させることで、足元1m程度の視野を遮蔽した。このケープは、被験者が実験への参加に関して同意した直後から実験終了まで、休憩時間も含めて着用されていたため、本実験中視覚による足部位置のフィードバックは行われていない。

2-4 比較した変数

本研究では、加齢が知覚誤差に与える影響を評価するために、次の3つの要因を独立変数として設定し、 $2 \times 2 \times 2$ の研究デザインとした：1) 加齢の影響(高齢者・若年者：2水準)、2) 知覚する足部の部位(足の内側・外側：2水準)、及び3) 利き足と非利き足の差(利き足・非利き足：2水準)。それぞれの変数について以下に詳述する。

本研究の従属変数である知覚誤差は、[被験者が知覚した足の位置-実際の足の位置(図2)]として上述の方眼紙を用いて計算したが、より詳細に分析するために、恒常誤差と絶対誤差の2つの観点から比較を行った。恒常誤差は、同一被験者が繰り返した同一条件における知覚誤差の平均値とした。恒常誤差を分析すると、知覚している足部の位置は実際の足部の位置よりも内側に位置する傾向があるのか、外側に位置する傾向があるのかに言及することができ

----- Actual foot edge ——— Perceived foot edge



An error between the perceived foot position and the actual foot position has defined as the distance between the target-line from the edge of the foot.

Fig.2 Definition of the constant errors

る。本研究では知覚している足部の位置は実際の足部の位置よりも内側に位置する場合には正の値、外側に位置する場合には負の値となるように恒常誤差を計算した(図2)。

一方、知覚している足部の位置が実際の足部の位置よりも内側にある場合と外側にある場合が混在していると、お互いが相殺されてしまうため、一見誤差が少なく見えるという性質を持つ。それに対し絶対誤差は、誤差の絶対値で比較を行うため、各条件でどの程度の誤差量が生じる傾向があるのかに言及することができる。但し、絶対誤差は計測された誤差の絶対値を取っているため、どちらの方向の誤差であったのかについては言及できない性質を持つ。本研究では、絶対誤差は、同一被験者が繰り返した同一条件における知覚誤差の絶対値の平均値とした。

2-5 手続き

実験の手順を以下に記す。被験者は別室で実験への参加に関する説明を受け同意書に署名後、上述のケープを着用した上で実験室に移動した。実験室入室後、被験者はカーペット上に設置した方眼紙の上に左右の足を肩幅程度間隔に開いた状態で立ち、基準線の位置調整用の紐を実験者から手渡された。実験を開始する前に被験者は基準線の操作に関する練習を行い、被験者本人が自由に位置を調整できることを確認した上で実験を開始した。

実験が開始されると、被験者は立位姿勢で実験者の各試行の条件(右足/左足・内側条件/外側条件)とスタートに関する指示を待った。条件の提示及びスタートの合図後、被験者は指定された足の部位に基準線が掛ったと思う場所まで基準線の位置を調整し、実験者に口頭で合図を行った。基準線の位置を調整する時間については特に制限時間は設けず、各試行で被験者が納得するまで調整できるようにした。

被験者から調整終了の合図が得られた時点で、実験者は指定した足部部位と基準線との左右方向の距離を上述の方眼紙の罫線を用いて目視で計測し、データシートに記録した。その後実験者は、基準線を次の試行の初期位置に移動させ実験を継続した。

被験者には事前に、実験中にバランスを失いそうになったらいつでも試行を中止して構わないこと、及び実験中はいつでも休憩がとれるため、焦らずリラックスして実験を実施するように教示した。実験は順序効果に配慮して各条件をランダムに提示することとしたが、基準線の初期位置によるバイアスも懸念された。そこで本研究では、基準線

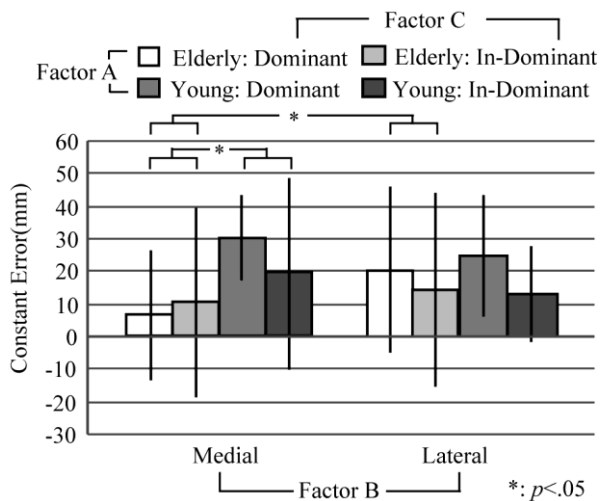


Fig.3 Mean (±SD) constant errors among the conditions

の初期位置についてもガイドレールの右端及び左端の2条件を設け、各条件につき5試行ずつ、計40試行(内外2条件×利き足非利き足2条件×初期位置左右2条件×繰り返し5試行)を各被験者に対し実施した。

3. 結果

3-1 恒常誤差の比較

はじめに、感覚上の足部位置と実際の足部位置との恒常誤差について、加齢の影響(高齢者・若年者)を因子A、知覚する足部部位(内側・外側)を因子B、利き足と非利き足の差(利き足・非利き足)を因子Cとした二要因に繰り返しのある三元配置分散分析を行った(図3)。その結果、因子Aと因子Bに関する交互作用($f_{(1,18)}=6.10, p<0.05$)のみが認められた。交互作用が確認されたため年齢ごとに詳細な分析を行ったところ、高齢者には因子Bに主効果($f_{(1,9)}=8.30, p<0.05$)が認められたのに対し、若年者には因子Bに主効果($f_{(1,9)}=1.29, n.s.$)が認められなかった。また年齢間の差を調べるため因子Aについて、内側を知覚する条件と外側を知覚する条件それぞれでt検定を行ったところ、内側を知覚する条件では高齢者と若年者の傾向に有意差が確認された(内側: $t=2.23, p<0.05$, 外側: $t=0.37, n.s.$)。これらの結果は、全体的には高齢者・若年者共に知覚している足の位置は実際の足の位置よりも内側にずれていることを示しており、先行研究の結果と一致する。しかし足部の内側を知覚する際には、高齢者の方が足部の内側をより小さな誤差で知覚している可能性が示された。しかし恒常誤差に関する分析だけでは、正方向の誤差と負方向の誤差が相殺されているだけである可能性も否定できない。そこで次に絶対誤差についての分析を行った。

3-2 絶対誤差の比較

絶対誤差に関する分析と同様、加齢の影響(高齢者・若年者)を因子A、知覚する足部部位(内側・外側)を因子B、利き足と非利き足の差(利き足・非利き足)を因子Cとした二要因に繰り返しのある三元配置分散分析を行った(図4)。その結果、絶対誤差に関する分析と同様、因子Aと因子Bに関する交互作用($f_{(1,18)}=6.34, p<0.05$)のみが認められた。交互作用が確認されたため年齢ごとに詳細な分析を行ったところ、高齢者には因子Bに有意傾向($f_{(1,9)}=3.61, p<0.10$)が認められたのに対し、若年者には因子Bには($f_{(1,9)}=3.22, n.s.$)が認められなかった。これらの結果から、

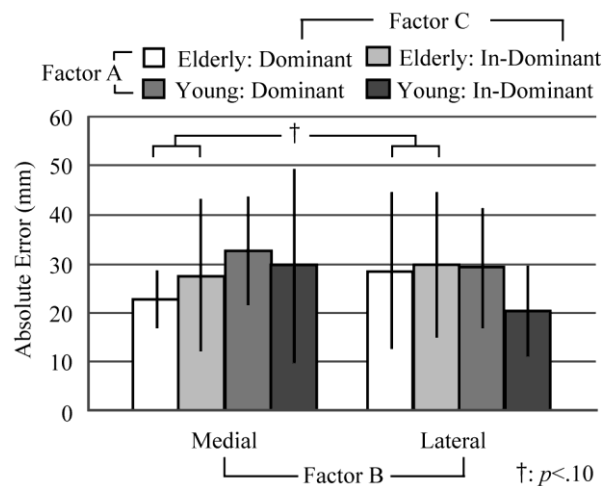


Fig.4 Mean (±SD) absolute errors among the conditions

高齢者が足部の内側を知覚する際には、外側を知覚する際よりも小さい誤差で知覚していることが示された。一方、若年者にはこの差が認められなかった。

4. 考察

4-1 測定された知覚誤差から考えられること

本研究は、歩行中のつまずきに関与すると考えられる、知覚している足部の位置と実際の足部の位置との誤差について、加齢の影響を評価した。実験の結果、全体的には高齢者も若年者も知覚している足部の位置が実際の足部の位置よりも内側にあることが確認された。この結果は先行研究で確認されている若年者の傾向と同様、高齢者の足部も本人が思っているよりも外側にずれていることを示しており、このような誤差が歩行中にも生じれば、本人が思わぬところに足の外側が引っ掛かることになり、不意のつまずきや、筆筒の角に足の小指をぶつけるという事故につながると考えられる。

更に本研究では、足部の内側を知覚する際には高齢者の方が若年者に比べて恒常誤差が有意に小さいという、興味深い結果が得られた(図3)。このことは一見すると高齢者の方が若年者よりも正確に足部内側の位置を知覚できることを示しているようにとれる。しかし同様の傾向が歩行中、特に著者らが先行研究で着目した、傾いた障害物を乗り越える際にも生じた場合、高齢者は恒常誤差の分だけ若年者よりも足部と障害物との距離に余裕がないため、つまずきが発生しやすくなると考えられる。若年者よりも高齢者の方がつまずきやすいことは多くの研究で報告されているが、その背景には今回の研究で確認されたような、足部の外側も内側もつまずきやすくなっている足部位置の知覚特性が関与しているという仮説が考えられる。

実際我々が以前行ったつまずいたことのある足部部位に関するアンケート調査では、第一趾の接触がつまずく原因となるリスクは高齢者の方が若年者よりも高いという結果が得られている(unpublished observation)。この調査では、インターネット調査会社を通じて日本国内に住む10代から70代の約1000人に対し、過去1年間につまずいた経験の有無と、その時につまずく原因となった足趾(第一趾から第五趾までで複数回答可)を聞いた。この調査で得られた結果から更に本研究の対象である60代(161名分)と20代(127名分)のデータをそれぞれ抽出して比較したとこ

る、高齢者では第一趾が高齢者全体の 23.8%であったのに対し、若年者では若年者全体のわずか 12.2%であり、第一趾のリスクは高齢者の方が若年者よりも 2 倍近く高いことが確認された。一方、第五趾の接触については高齢者が全体の 40.2%、若年者が 56.4%といずれも全体の半数程度であり、第一趾及び第五趾の接触がつまずきの原因となった経験と上述した本研究の結果から考えられる仮説とは一致している。

4-2 知覚誤差が生じる原因として考えられる事柄

このような高齢者特有のつま先位置の知覚誤差が生じる原因については今後更なる研究を進める必要があるが、本研究の結果からは人の身体寸法に関する知覚が関与している可能性が提案できる。本研究では、知覚している足部の寸法（足幅）を直接計測するような実験を行ったわけではないが、足部の内側を知覚した際の恒常誤差と外側を知覚した際との恒常誤差との間に差がなければ、被験者が知覚している足幅は実際の足幅と同様で、位置だけがずれている可能性が考えられる。このような観点から本実験の結果を見ると、知覚する足部の部位に関する因子（因子 B）は高齢者のみ有意差が認められており、高齢者は足幅を実際よりも狭く知覚している可能性が考えられる。もし高齢者が本人の足幅を実際よりも狭く知覚する傾向があるならば、位置の誤差と同様、本人が思っていないところに足が存在することに繋がり、これによって歩行中のつまずきやすさが増加する可能性が指摘できる。転倒しやすい高齢者の知覚誤差に関しては、このような身体寸法に関する誤差やこれまで評価してきた身体位置の誤差だけでなく、身体能力の誤差も提案されている⁽¹⁰⁾。今後はこれらの誤差の総合的な評価も必要であろう。

4-3 知覚誤差を利用した転倒予防策の提案と今後の展望

これまでに確認されてきた様々な知覚誤差が転倒に影響している可能性が考えられた。しかし著者らはすべての知覚誤差を無くす、もしくは減少させる必要はなく、それらを上手に利用することで結果的につまずきや転倒のリスクを減少させたり、歩行させたりすることが可能であると考えている。

例えば Elliott ら⁽¹¹⁾は、被験者が跨ぎ越える障害物の段鼻に縦方向の縞模様を描くと、障害物の高さを被験者が錯覚し、余分に足部を持ち上げることで、より安全に障害物を跨ぎ越えさせることができることを報告している。また Prokop ら⁽¹²⁾は、歩行中の光学的流動を作為的に調整することで、歩行者本人には気付かれずに歩行速度を調整させられることを報告している。これらの結果はいずれも人が本人の歩容を正確に知覚できていないために生じている現象である。本研究でも床からつま先を持ち上げる際の知覚誤差は、本人が思っているよりも高い位置につま先があることからつまずきのリスクにはなりえず、むしろクリアランスが大きく確保できるため、遊脚期につま先が上昇している際に障害物などを跨ぎ越えられるよう環境を整備することで、より安全な歩行に繋がれる可能性が考えられる。そのためには、つまずきや転倒などのリスクに繋がるような知覚誤差とそうでない知覚誤差とを整理し、積極的に利用できる環境を整える必要があると考えられる。今後はこのような観点から研究を実施していきたいと考えている。

5. 結論

本研究は、歩行中のつまずきに関与すると考えられる、知覚している足部の位置と実際の足部の位置との誤差について、加齢の影響を評価した。その結果以下のことが明らか

かになった。

1) 高齢者、若年者共に、全体的には知覚している足部の位置が実際の足部の位置よりも内側にあることが確認された。

2) しかし内側を知覚する際には高齢者の方が若年者に比べて知覚誤差が有意に小さかった。

以上のような知覚誤差の傾向は、高齢者は若年者よりも足部の内側がつまずきやすいというアンケート結果と一致していることから、本研究で確認されたような知覚誤差がつまずきの一因となっていると考えられた。

参考文献

- (1) 近藤敏, 宮前珠子, 堤文生, 在宅高齢者の転倒と転倒恐怖, OT ジャーナル, Vol. 33, pp. 839-844, 1999.
- (2) 眞野行生編, 高齢者の転倒・転倒後症候群, 医歯薬出版, pp.2-7, 1999.
- (3) 武藤芳照, 太田美穂, 上岡洋晴, 朴眩泰, 岡田真平, 黒柳律雄, 上野勝則, 在宅高齢者の転倒・転落事故要因に関する研究, 交通安全対策振興助成研究報告書(一般研究), Vol. 14, pp. 114-120, 1999.
- (4) Tinetti ME., Speechley M., and Ginter SF., Risk factors for falls among elderly persons living in the community, The New England Journal of Medicine, Vol. 319, No. 26, pp. 1701-1707, 1988.
- (5) 小林吉之, 嶺也守寛, 藤本浩志, ヒト足部の身体位置覚に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol. 73, No. 725, pp. 274-279, 2007.
- (6) Yoshiyuki Kobayashi, Hiroshi Fujimoto, Kimitaka Nakazawa, and Masami Akai, Foot Position Tends to Be Sensed as More Medial Than the Actual Foot Position, Journal of Motor Behavior, Vol. 41, No. 5, pp. 437-43, 2009.
- (7) 小林吉之, 高橋健, 長尾裕太, 藤本浩志, 人が知覚しているつま先位置と実際のつま先位置との誤差の特性-歩行中のつまずきの原因の一つとして考えられる垂直方向の誤差の評価, 日本機械学会論文集C編, 投稿中.
- (8) Pickard CM., Sullivan PE., Allison GT., and Singer, KP., Is there a difference in hip joint position sense between young and older groups?, Journal of Gerontology: Medical Sciences, Vol. 58A, pp. 631-635, 2003.
- (9) 小林吉之, 嶺也守寛, 藤本浩志, 傾いた障害物を跨いで越える際の歩容に関する研究, バイオメカニズム学会誌, Vol. 30, No. 2, pp. 85-92, 2006.
- (10) Ogawa M., Yamato K., Miyaguchi H., and Murakami T., The relation between the perception of affordances and actual motor performance on the maximum height in stepping-over task in aging, 広島大学保健学ジャーナル, Vol. 7, No. 2, pp. 43-50, 2008.
- (11) Elliott DB., Vale A., Whitaker D., and Buckley JG., Does my step look big in this? A visual illusion leads to safer stepping behavior, PLoS One, Vol. 4, No. 2, e4577, 2009.
- (12) Prokop T., Schubert M., and Berger W., Visual influence on human locomotion Modulation to changes in optic flow Modulation to changes in optic flow, Experimental Brain Research, Vol. 114, No. 1, pp. 63-70, 1997.