PICAPD مجموعه دستورالعمل معماری

مرجع برنامه‌نویسان ویرایش ۱.۰

محاسبات مبتنی بر فیزیک برای دینامیک جمعیت خودمختار

۱. حالت معماری

۱.۱ فایل‌های ثبات

۱.۱.۱ ثبات‌های عمومی (GPR)

هدف	عرض	تعداد	بانک ثبات
محاسبات عمومی، آدرس‌دهی	۶۴-بیتی	۳۲	**صحیح (X)**
گشتاورها، FP64 محاسبات	۶۴-بیتی	۳۲	**اعشاری (F)**
حالت‌های قید (۰=مخل، ۱=برآورده)	۱-بیتی	۵۱۲	**رویداد (E)**
مجموعه ۳۲) μ_0-μ_3 گشتاورهای جمعیت × ۴ گشتاور)	۶۴-بیتی	۱۲۸	**گشتاور (M)**
بافرهای جریانی متن	۱۰۲۴-بیتی	۶۴	**متن (C)**
حالت تکرار میانگین حسابی-هندسی	۶۴-بیتی	۳۲	**حالت AGM (A)**
برچسب‌های زمانی ترتیبی علّی	۶۴-بیتی	۱۶	**ساعت برداری (V)**
معیارهای اعتبار عامل	۳۲-بیتی	۲۵۶	**امتیاز اعتماد (T)**

توجه: تمام ثبات‌ها مستقیماً توسط دستورات قابل آدرس‌دهی هستند. ثبات‌های رویداد به صورت بیتی آدرس‌پذیرند.

۱.۱.۲ ثبات‌های ویژه

ثبات	عرض	توضیح
PC	۶۴-بیتی	شمارنده برنامه (اشاره‌گر دستور)
STATUS	۶۴-بیتی	وضعیت و کنترل پردازنده
VECTOR	۶۴-بیتی	طول برداری فعال برای عملیات SIMD
EPU_ID	۱۶-بیتی	شناسه واحد پردازش رویداد (۰-۱۰۰ برای کارگران، ۱۰۰-۱۰۹ برای مدیران، ۱۱۰ برای ملکه)
HIERARCHY	۱۶-بیتی	سطح سلسله‌مراتب فعلی عامل
TIMESTAMP	۶۴-بیتی	شمارنده زمان‌بندی دقیق چرخه

۱.۱.۳ فرمت ثبات STATUS

```
63     60 59     56 55     52 51     48 47     32 31     16 15      0
┌──────────┬──────────┬──────────┬──────────┬──────────────┬──────────────┬──
│   RES    │   MODE   │   EVT    │   CON    │    VEC_LEN   │    AGM_CNT   │  M
└──────────┴──────────┴──────────┴──────────┴──────────────┴──────────────┴──

MODE[3:0]: 0000=انتظار، 0001=فعال، 0010=عقب‌گرد، 0011=خواب زمستانی
EVT[3:0]:  حالت انتشار رویداد
CON[3:0]:  ماسک نقض قید
VEC_LEN:   طول برداری فعلی (۰-۶۵۵۳۵)
AGM_CNT:   شمارنده تکرار AGM (۰-۳۱)
MOM_ERR:   پرچم‌های خطای تحقق‌پذیری گشتاور
```

۱.۲ فضای آدرس حافظه

۱.۲.۱ نقشه آدرس

```
0x0000_0000_0000_0000 - 0x0000_0000_3FFF_FFFF: حالت لاگرانژی L0 (۵۱۲ ت
0x0000_0001_0000_0000 - 0x0000_0001_3FFF_FFFF: حافظه پنهان مسیر L1 (۱
0x0000_0002_0000_0000 - 0x0000_0002_FFFF_FFFF: اشتراکی سراسری L2 (۴ ت
0x0000_0010_0000_0000 - 0x0000_001F_FFFF_FFFF: حافظه اصلی HBM3 (۶۴ بت
0xFFFF_0000_0000_0000 - 0xFFFF_0000_0000_FFFF: فضای I/O (۶۴ کیلوبایت)
0xFFFF_8000_0000_0000 - 0xFFFF_8000_7FFF_FFFF: پیکربندی/CSR (۲ گابایت
```

۱.۲.۲ ترتیب بایت

- **Little-endian**: تمام مقادیر چندبایتی با کم‌اهمیت‌ترین بایت در پایین‌ترین آدرس ذخیره می‌شوند
- **تراز**: نیاز به تراز طبیعی (۸-بایتی برای ۶۴-بیتی، ۱۶-بایتی برای ۱۲۸-بیتی)
- **عدم تراز**: باعث استثناء تراز می‌شود (کد تَرَپ ۴)

۱.۳ فضای I/O

عرض ۳۲- I/O ثبات‌های KB. نگاشت‌شده در حافظه با فضای آدرس جداگانه ۶۴ I/O بیتی دارند.

۲. فرمت‌های دستور

۲.۱ فرمت‌های ثابت ۳۲-بیتی

۲.۱.۱ نوع E- (کنترل رویداد)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11        0
┌────────────┬────────┬────────┬────────┬────────────┐
│   opcode   │   rd   │ funct3 │  rs1   │   imm12    │
└────────────┴────────┴────────┴────────┴────────────┘
7 بیت  12 بیت   5 بیت   3 بیت   5 بیت        بیت

هدف: عملیات ثبات رویداد با مقدار فوری ۱۲-بیتی
```

۲.۱.۲ نوع M- (عملیات گشتاور)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11    7 6        0
┌──────────┬────────┬────────┬────────┬────────┬──────────┐
│  opcode  │   rd   │ funct3 │  rs1   │  rs2   │ funct7   │
└──────────┴────────┴────────┴────────┴────────┴──────────┘
7 بیت  7 بیت   5 بیت   5 بیت   3 بیت   5 بیت        بیت

هدف: محاسبات گشتاور با دو ثبات مبدأ
```

۲.۱.۳ نوع-A (عملیات AGM)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11    7 6        0
┌──────────┬────────┬────────┬────────┬────────┬──────────┐
│  opcode  │   rd   │ funct3 │  rs1   │  rs2   │ funct7   │
└──────────┴────────┴────────┴────────┴────────┴──────────┘

هدف: تکرارهای میانگین حسابی-هندسی
```

۲.۱.۴ نوع-C (جریان متن)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11        0
┌──────────┬────────┬────────┬────────┬──────────┐
│  opcode  │   rd   │ funct3 │  rs1   │  imm12   │
└──────────┴────────┴────────┴────────┴──────────┘

هدف: عملیات جریانی متن
```

۲.۱.۵ نوع-H (سلسله‌مراتب)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11    7 6        0
┌──────────┬────────┬────────┬────────┬────────┬──────────┐
│  opcode  │   rd   │ funct3 │  rs1   │  rs2   │ funct7   │
└──────────┴────────┴────────┴────────┴────────┴──────────┘

هدف: مدیریت سلسله‌مراتب عامل
```

۲.۱.۶ نوع-S (ایمنی/قید)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11    7 6        0
┌──────────┬────────┬────────┬────────┬────────┬──────────┐
│  opcode  │   rd   │ funct3 │  rs1   │  rs2   │   tol    │
└──────────┴────────┴────────┴────────┴────────┴──────────┘
7 بیت تحمل  7 بیت   5 بیت   5 بیت   3 بیت   5 بیت      بیت

هدف: بررسی ایمنی با مشخص‌سازی تحمل
```

۲.۱.۷ نوع V- (مکانیک واریاسیونی)

```
31          25 24   20 19   17 16   12 11    7 6        0
┌──────────┬────────┬────────┬────────┬────────┬──────────┐
│  opcode  │   rd   │ funct3 │  rs1   │  rs2   │ funct7   │
└──────────┴────────┴────────┴────────┴────────┴──────────┘

هدف: عملیات مکانیک واریاسیونی
```

۲.۲ فرمت‌های مقدار فوری

- **imm12**: مقدار فوری علامت‌دار ۱۲-بیتی، علامت-گسترش‌یافته به ۶۴ بیت
- **imm5**: مقدار فوری بدون علامت ۵-بیتی برای مرتبه گشتاور k
- **tol**: مشخص‌سازی تحمل ۷-بیتی (۰=سختگیرانه تا ۱۲۷=غیرفعال)

۲.۳ تخصیص کد عملیاتی

کد عملیاتی [6:0]	دسته	دستورات پایه
0000011	کنترل رویداد	ESET, ECLEAR, ETEST, EWAIT, EBCAST
0001011	عملیات گشتاور	MOM.CALC, MOM.COMP, MOM.XPORT, MOM.REAL
0010011	AGM/بیضوی	AGM.ITER, ELI.COMP, TXF.PASS
0011011	جریان متن	CTX.SLICE, CTX.AGG, CTX.SYNTH
0100011	سلسله‌مراتب	HIER.SPAWN, HIER.TERM, HIER.EVOL

کد عملیاتی [6:0]	دسته	دستورات پایه
0101011	ایمنی/قید	CONS.CHK, RES.BUDG, BYZ.CONS, TMR.VOTE, SAFE.ROLL
0110011	ارتباط بین عاملی	MSG.SEND, MSG.RECV, MSG.ACK, CONS.PROP, WAL.LOG
0111011	مکانیک واریاسیونی	LEVAL, LGRAD_Q, LGRAD_V, ACTION, VERLET, HAMILT, AGRAD, ATHRESH
1000011	تبدیل مختصات	CYCLIC, CTRANS, CJACOB
1001011	ادغام حسگر	SFSPU.SYNC, SFSPU.KF, SFSPU.IPS, SFSPU.PROJ
1110011	سیستم/امتیازی	ECALL, ERET, MRET, WFI, CSR*

۳. حالت‌های آدرس‌دهی

۳.۱ آدرس‌دهی ثبات

- **مستقیم ثبات**: تمام عملوندها در ثبات‌ها (نوع-V، نوع-H، نوع-A، نوع-M)
- **غیرمستقیم ثبات**: ثبات پایه + افست (دستورات بارگذاری/ذخیره)

۳.۲ آدرس‌دهی فوری

- **فوری**: ثابت جاسازی‌شده در دستور (نوع-C، نوع-E)
- **نسبی به PC**: PC + افست علامت‌دار (دستورات انشعاب)

۳.۳ آدرس‌دهی حافظه

- **پایه+افست**: آدرس مؤثر = X[rs1] + علامت-گسترش(imm12)
- **پایه+شاخص**: آدرس مؤثر = X[rs1] + X[rs2] (برای بارگذاری‌های برداری)
- **نسبی به PC**: برای واکشی دستور و استخرهای ثابت

۳.۴ آدرس‌دهی رویداد

- **مستقیم**: ثبات رویداد اندیس‌شده توسط مقدار فوری ۱۲-بیتی (۰-۵۱۱)
- **غیرمستقیم**: ثبات رویداد اندیس‌شده توسط X[rs1] (از ۹ بیت پایین استفاده می‌شود)

۳.۵ آدرس‌دهی متن

- **جریانی**: ثبات‌های متن اندیس‌شده توسط فیلد ۶-بیتی (از imm12[5:0])
- **پخش همگانی**: تمام ثبات‌های متن (کدگذاری ویژه)

۴. مجموعه دستورات

۴.۱ دستورات کنترل رویداد

ESET - تنظیم ثبات رویداد

```
فرمت:   ESET rs1, imm12
کدگذاری: [0000011][rs1][000][rs1][imm12]
عملکرد: event[imm12[8:0]] ← 1
          ارسال سیگنال بیداری به EPU های وابسته
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: EventOutOfRange (اگر imm12 > 511)
```

ECLEAR - پاک کردن ثبات رویداد

```
فرمت:   ECLEAR rs1, imm12
کدگذاری: [001][00000][0000011][rs1][imm12]
عملکرد: event[imm12[8:0]] ← 0
          آغاز آبشار عقبگرد برای محاسبات وابسته
پرچم‌ها:    STATUS.CON[ROLLBACK] ← 1
استثناءها: EventOutOfRange, RollbackRequired
```

ETEST - آزمایش حالت رویداد

```
فرمت:   ETEST rd, imm12
کدگذاری: [rd][010][00000][imm12][0000011]
عملکرد: X[rd] ← zero_extend(event[imm12[8:0]])
پرچم ها:    هیچکدام
استثناء ها: EventOutOfRange
```

EWAIT - انتظار برای رویداد

```
فرمت:   EWAIT imm12
کدگذاری: [imm12][00000][011][00000][0000011]
عملکرد: توقف اجرا تا زمانی که event[imm12[8:0]] == 1
        هسته وارد حالت انتظار کم‌مصرف می‌شود
پرچم ها:    STATUS.MODE ← WAIT
استثناء ها: EventOutOfRange
```

EBCAST - پخش همگانی رویداد

```
فرمت:   EBCAST imm12, rs1
کدگذاری: [rs1][imm12][100][00000][0000011]
عملکرد: پخش حالت event[imm12[8:0]] به EPUماسک‌های موجود در بیت X[rs1
پرچم ها:    هیچکدام
استثناء ها: EventOutOfRange
```

۴.۲ عملیات گشتاور

MOM.CALC - محاسبه گشتاور

```
فرمت:   MOM.CALC rd, rs1, imm5
کدگذاری: [rd][000][rs1][imm5][0000000][0001011]
عملکرد: F[rd] ← ∫₀^∞ x^{imm5} n(x) dx
        شروع می‌شود X[rs1] از آدرس n(x) که در آن توزیع
پرچم ها:    STATUS.MOM_ERR[PRECISION] در خطای عددی
استثناء ها: MemoryFault, DivideByZero
```

MOM.COMP - فشرده‌سازی گشتاورها

```
فرمت:   MOM.COMP rd, rs1, rs2
کدگذاری: [0001011][rd][001][rs1][rs2][0000000]
عملکرد: M[rd] ← aggregate(M[rs1], M[rs2]) با فشرده‌سازی ۸۹.۷:۱
          را تأیید می‌کند μ₁² ≤ μ₀·μ₂ نابرابری هاسدورف
پرچم‌ها:    STATUS.MOM_ERR[HAUSDORFF] در صورت نقض
استثناءها: ConstraintViolation
```

MOM.XPORT - انتقال گشتاور

```
فرمت:   MOM.XPORT rd, rs1, rs2
کدگذاری: [0001011][rd][010][rs1][rs2][0000000]
عملکرد: M[rd] ← evaluate ∂μ/∂t + ∇·(uμ) = S(μ)
          M[rs2] عبارت‌های مبدأ از، u = F[rs1] که در آن
پرچم‌ها:    STATUS.MOM_ERR[CONSERVATION] در صورت نقض
استثناءها: ConstraintViolation
```

MOM.REAL - بررسی تحقق‌پذیری

```
فرمت:   MOM.REAL rd, rs1
کدگذاری: [0001011][rd][011][rs1][00000][0000000]
عملکرد: X[rd] ← violation_bitmask(M[rs1])
          ماتریس هانکل بررسی‌ها: μ₀≥0, μ₁²≤μ₀·μ₂, 0≤
پرچم‌ها:    STATUS.MOM_ERR ← X[rd]
استثناءها: هیچ‌کدام
```

۴.۳ عملیات AGM

AGM.ITER - تکرار تکی AGM

```
فرمت:   AGM.ITER rd, rs1, rs2
کدگذاری: [0010011][rd][000][rs1][rs2][0000000]
عملکرد: a_new = (A[rs1].a + A[rs2].g)/2
          g_new = √(A[rs1].a × A[rs2].g)
          A[rd] ← (a_new, g_new)
پرچم‌ها:    STATUS.AGM_CNT ← STATUS.AGM_CNT + 1
استثناءها: هیچ‌کدام
```

ELI.COMP - انتگرال بیضوی کامل

```
فرمت:   ELI.COMP rd, rs1
کدگذاری: [0010011][rd][001][rs1][00000][0000000]
عملکرد: F[rd] ← K(m) = π/[2·AGM(1, √(1-m))]
          که در آن m = F[rs1]
          را داخلی اجرا می‌کند AGM تکرار ۵
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: DomainError (اگر m∉[0,1])
```

TXF.PASS - انفعال تابع انتقال

```
فرمت:   TXF.PASS rd, rs1, rs2
کدگذاری: [0010011][rd][010][rs1][rs2][0000000]
عملکرد: X[rd] ← 1 اگر تمام قطب‌ها در LHP ۰ باشند، در غیر این صورت
          M[rs2] مخرج در ،M[rs1] ضرایب صورت در
          از معیار روث-هورویتز استفاده می‌کند
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

۴.۴ عملیات جریان متن

CTX.SLICE - برش متن

```
فرمت:   CTX.SLICE rd, rs1
کدگذاری: [0011011][rd][000][rs1][00000][0000000]
عملکرد: تقسیم C[rs1] (۱۰۲۴-بیتی) → قطعات ۱۰۰-بیتی
          EPU_ID های کارگر بر اساس EPU مسیریابی قطعات به
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: ContextOverflow
```

CTX.AGG - تجمیع متن

```
فرمت:   CTX.AGG rd, rs1
کدگذاری: [0011011][rd][001][rs1][00000][0000000]
عملکرد: تجمیع ۱۰ خروجی کارگر → نمایش مدیر
          f∈{OR,AND,MAJORITY,WE که در آن C[rd] ← f_aggregate(C[rs1])
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

CTX.SYNTH - سنتز متن

```
فرمت:   CTX.SYNTH rd, rs1
کدگذاری: [rd][010][rs1][00000][0000000][0011011]
عملکرد: سنتز ۱۰ خروجی مدیر → تصمیم دودویی ملکه
          یک تابع بولی است f که در آن X[rd] ← f_decision(C[rs1])
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

۴.۵ مدیریت سلسله‌مراتب

HIER.SPAWN - ایجاد عامل

```
فرمت:   HIER.SPAWN rd, rs1, imm5
کدگذاری: [rd][000][rs1][imm5][0000000][0100011]
عملکرد: ایجاد عامل جدید در سطح سلسله‌مراتب imm5
          M[rs1] ارثبری از عامل والد
          X[rd] ← تخصیص شناسه عامل
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: ResourceExhausted, HierarchyViolation
```

HIER.TERM - خاتمه عامل

```
فرمت:   HIER.TERM rs1
کدگذاری: [rs1][00000][0000000][001][00000][0100011]
عملکرد: خاتمه عامل X[rs1]، بازیابی منابع
          به‌روزرسانی گشتاورهای جمعیت
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: InvalidAgentID
```

HIER.EVOL - تکامل قابلیت

```
فرمت:   HIER.EVOL rd, rs1, rs2
کدگذاری: [rd][010][rs1][rs2][0000000][0100011]
عملکرد: M[rd] ← M[rs1] + α·(M[rs2] - M[rs1])
          نرخ یادگیری α = 0.001/cycle که در آن
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

۴.۶ دستورات ایمنی و قید

CONS.CHK - بررسی پایستگی

```
فرمت:   CONS.CHK rd, rs1, rs2, tol
کدگذاری: [0101011][rd][000][rs1][rs2][tol]
عملکرد: X[rd] ← 1 اگر |Σinputs - Σoutputs| < 10^{-tol/16}، ۰ ین صورت
          M[rs2] خروجی‌ها در ،M[rs1] ورودی‌ها در
پرچم‌ها:    STATUS.CON[CONSERVATION] ← ~X[rd]
استثناءها: هیچ‌کدام
```

RES.BUDG - اجرای بودجه منابع

```
فرمت:   RES.BUDG rd, rs1
کدگذاری: [0101011][rd][001][rs1][00000][0000000]
عملکرد: X[rd] ← 1 اگر تخصیص + cost(M[rs1]) ≤ budget، ۰ غیر این صورت
پرچم‌ها:    STATUS.CON[BUDGET] ← ~X[rd]
استثناءها: هیچ‌کدام
```

BYZ.CONS - اجماع بیزانسی

```
فرمت:   BYZ.CONS rd, rs1, quorum
کدگذاری: [0101011][rd][010][rs1][quorum][0000000]
عملکرد: اجرای اجماع بیزانسی ۳-فازه
          = quorum اندازه کوروم ،X[rs1] تراکنش در آدرس
          (۰=لغوشده ،۱=تأییدشده) نتیجه → X[rd]
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: ConsensusTimeout, QuorumUnreachable
```

TMR.VOTE - رأی افزونگی مدولار سه‌گانه

```
فرمت:   TMR.VOTE rd, rs1, rs2, rs3
کدگذاری: [0101011][rd][011][rs1][rs2][rs3]
عملکرد: X[rd] ← majority(X[rs1], X[rs2], X[rs3])
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

SAFE.ROLL - عقب‌گرد ایمنی

```
فرمت:   SAFE.ROLL rs1
کدگذاری: [rs1][00000][0000000][100][00000][0101011]
عملکرد: عقب‌گرد به نقطه کنترل در آدرس X[rs1]
          بازیابی حالت از ثبت وقایع پیش‌نویس
پرچم‌ها:    STATUS.MODE ← ROLLBACK
استثناءها: CheckpointNotFound, LogCorrupted
```

۴.۷ مکانیک واریاسیونی

LEVAL - ارزیابی لاگرانژین

```
فرمت:   LEVAL rd, rs1, rs2
کدگذاری: [rd][000][rs1][rs2][0000000][0111011]
عملکرد: F[rd] ← L(q, q̇) = T(q̇) - V(q)
          که در آن q = M[rs1], q̇ = M[rs2]
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

LGRAD_Q - گرادیان نسبت به مختصات

```
فرمت:   LGRAD_Q rd, rs1, rs2
کدگذاری: [rd][001][rs1][rs2][0000000][0111011]
عملکرد: M[rd] ← ∂L/∂q در (q=M[rs1], q̇=M[rs2])
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

LGRAD_V - گرادیان نسبت به سرعت‌ها

```
فرمت:   LGRAD_V rd, rs1, rs2
کدگذاری: [rd][010][rs1][rs2][0000000][0111011]
عملکرد: M[rd] ← ∂L/∂q̇ در (q=M[rs1], q̇=M[rs2])
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام
```

ACTION - انتگرال کنش

فرمت: ACTION rd, rs1, rs2, imm
کدگذاری: [0111011][rd][011][rs1][rs2][imm]
عملکرد: F[rd] ← ∫_{t1}^{t2} L dt
که در آن t1 = F[rs1], t2 = F[rs2]
روش انتگرال‌گیری: 0=ذوزنقه‌ای، 1=سیمپسون
پرچم‌ها: هیچ‌کدام
استثناءها: IntegrationError

VERLET - گام سرعت ورلت

فرمت: VERLET rd, rs1, rs2, rs3, rs4
کدگذاری: [0111011][rd][100][rs1][rs2][rs3:rs4]
عملکرد: $M[rd] \leftarrow 2\cdot M[rs1] - M[rs2] + M^{-1}[rs3]\cdot F\cdot \Delta t^2$
که در آن $\Delta t = F[rs4]$
پرچم‌ها: هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام

HAMILT - ارزیابی هامیلتونی

فرمت: HAMILT rd, rs1, rs2, rs3, rs4
کدگذاری: [0111011][rd][101][rs1][rs2][rs3:rs4]
عملکرد: $F[rd] \leftarrow H = \frac{1}{2}\dot{q}^T\cdot M_0\cdot\dot{q} + \frac{1}{2}q^T\cdot K_0\cdot q$
که در آن $q=M[rs1]$, $\dot{q}=M[rs2]$, $M_0=M[rs3]$, $K_0=M[rs4]$
پرچم‌ها: هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام

AGRAD - بزرگی گرادیان کنش

فرمت: AGRAD rd, rs1, rs2
کدگذاری: [0111011][rd][110][rs1][rs2][0000000]
عملکرد: $F[rd] \leftarrow \|\nabla_q S\| = \sqrt{[\Sigma_i (\partial S/\partial q_i)^2]}$
مسیر در M[rs1]، وزن‌ها در M[rs2]
پرچم‌ها: هیچ‌کدام
استثناءها: هیچ‌کدام

ATHRESH - آستانه گرادیان کنش

```
فرمت:   ATHRESH rd, rs1, rs2, imm
کدگذاری: [0111011][rd][111][rs1][rs2][imm]
عملکرد: X[rd] ← (‖∇_q S‖/σ²_q > 10^{-imm/32}) ? 1 : 0
          که در آن ∇_q S = M[rs1], σ²_q = F[rs2]
پرچم‌ها:    STATUS.MODE[ACTIVE] ← X[rd]
استثناءها: هیچ‌کدام
```

۴.۸ دستورات سیستم

ECALL - فراخوان محیط

```
فرمت:   ECALL
کدگذاری: [000000000000][00000][000][00000][1110011]
عملکرد: درخواست سرویس از محیط اجرا
          X[11]-X[17] آرگومان‌ها در، X[10] شماره سرویس در
          X[10] مقدار بازگشتی در
پرچم‌ها:    هیچ‌کدام
استثناءها: EnvironmentCall (تَرَپ به سرپرست)
```

ERET - بازگشت از استثناء

```
فرمت:   ERET
کدگذاری: [000000000000][00000][001][00000][1110011]
عملکرد: بازگشت از پردازنده استثناء
          PC ← EPC, STATUS ← بازیابی‌شده از پشته استثناء
پرچم‌ها:    STATUS بازیابی می‌شود
استثناءها: هیچ‌کدام
```

MRET - بازگشت از حالت ماشین

```
فرمت:   MRET
کدگذاری: [000000000000][00000][010][00000][1110011]
عملکرد: بازگشت از تَرَپ حالت ماشین
          PC ← MEPC, STATUS بازیابی‌شده از mstatus
پرچم‌ها:    وضعیت ماشین بازیابی می‌شود
استثناءها: هیچ‌کدام
```

WFI - انتظار برای وقفه

```
فرمت:   WFI
کدگذاری: [000000000000][00000][011][00000][1110011]
عملکرد: انتظار برای وقفه، ورود به حالت کم‌مصرف
                ادامه با وقفه یا پخش رویداد
پرچم‌ها:    STATUS.MODE ← HIBERNATED
استثناءها: هیچ‌کدام
```

دستورات CSR

```
CSRRW rd, csr, rs1:  تبادل اتمی: t = CSR[csr]; CSR[csr] = X[rs1]; X[r
CSRRS rd, csr, rs1:  خواندن/تنظیم بیت‌های اتمی: t = CSR[csr]; CSR[csr
CSRRC rd, csr, rs1:  خواندن/پاک کردن بیت‌های اتمی: t = CSR[csr]; CSR[
CSRRWI, CSRRSI, CSRRCI: نسخه‌های فوری (مقدار فوری ۵-بیتی)
```

۵. مدل حافظه

۵.۱ مدل سازگاری

- **سازگاری انتشار**: عملیات جدا شده توسط نقاط همگام‌سازی
- **ترتیب‌دهی مبتنی بر رویداد**: ثبات‌های رویداد همگام‌سازی صریح فراهم می‌کنند
- **ثبت وقایع پیش‌نویس**: تمام تغییرات حالت قبل از تأیید ثبت می‌شوند

۵.۲ عملیات اتمی

```
AMOSWAP.W: تبادل اتمی واژه (۳۲-بیتی)
AMOADD.D:  جمع اتمی دوواژه (۶۴-بیتی)
AMOAND.D:  اتمی دوواژه AND
AMOOR.D:   اتمی دوواژه OR
AMOXOR.D:  اتمی دوواژه XOR
AMOMAX.D:  ماکزیمم اتمی
AMOMIN.D:  مینیمم اتمی
```

۵.۳ ترتیب‌دهی حافظه

- EPUها آزاد در بین EPU، **بارگذاری-بارگذاری**: مرتب درون یک
- EPU **بارگذاری-ذخیره**: مرتب درون یک
- **ذخیره-ذخیره**: مرتب به یک آدرس، آزاد در غیر این صورت
- معنای انتشار/دریافت فراهم می‌کنند ESET/ECLEAR: **همگام‌سازی رویداد**

۵.۴ نیازمندی‌های تراز

تراز مورد نیاز	اندازه داده
بایت ۱	بایت
بایت ۲	نیم‌واژه
بایت ۴	واژه
بایت ۸	دوواژه
بایت ۱۶	چهارواژه
بایت ۱۲۸	متن

دسترسی عدم تراز باعث استثناء تراز می‌شود (کد تَرَپ ۴).

۶. معماری استثناء و وقفه

۶.۱ انواع استثناء

۶.۱.۱ استثناءهای همزمان (تِرَپ)

توضیح	علت	کد تَرَپ
تراز ۴-بایتی ندارد PC	InstructionMisaligned	۰
واکشی دستور ناموفق	InstructionAccessFault	۱
کد عملیاتی یا کدگذاری نامعتبر	IllegalInstruction	۲
دستور EBREAK	Breakpoint	۳

توضیح	علت	کد تَرَپ
آدرس بارگذاری تراز نشده	LoadAddressMisaligned	۴
بارگذاری ناموفق	LoadAccessFault	۵
آدرس ذخیره تراز نشده	StoreAddressMisaligned	۶
ذخیره ناموفق	StoreAccessFault	۷
دستور ECALL	EnvironmentCall	۸
نقض گشتاور/هاسدورف	ConstraintViolation	۹
عدم منابع برای ایجاد عامل	ResourceExhausted	۱۰
زمان‌سنج اجماع بیزانسی	ConsensusTimeout	۱۱
اندیس ثبات رویداد > ۵۱۱	EventOutOfRange	۱۲
عملیات سلسله‌مراتبی نامعتبر	HierarchyViolation	۱۳

۶.۱.۲ وقفه‌های ناهمزمان

توضیح	اولویت	وقفه
وقفه تایمر ماشین	۷ (بالاترین)	۰
وقفه خارجی ماشین	۶	۱
وقفه تایمر سرپرست	۵	۲
وقفه خارجی سرپرست	۴	۳
وقفه تایمر کاربر	۳	۴
وقفه خارجی کاربر	۲	۵
وقفه پخش رویداد	۱	۶
وقفه مانیتور عملکرد	۰	۷

۶.۲ پردازش تَرَپ

۶.۲.۱ ثبات‌های تَرَپ

```
mtvec:      آدرس پایه بردار تَرَپ ماشین
mepc:       PC استثناء ماشین (در تَرَپ PC)
mcause:     علت تَرَپ ماشین (کد استثناء)
mtval:      مقدار تَرَپ ماشین (اطلاعات اضافی)
mstatus:    ثبات وضعیت ماشین
mscratch:   ثبات خراش ماشین
```

۶.۲.۲ ورود تَرَپ

۱. **mcause** ← ۲ علت تَرَپ. **mepc** ← PC ۳ دستور گرفتار شده. **mtval** ← آدرس یا ۴ دستور خطادار. **PC** ← mtvec (حالت مستقیم) یا mtvec + ۴×mcause (برداری) ۵. **mstatus.MPIE** ← mstatus.MIE (ذخیره فعال‌سازی وقفه) ۶. **mstatus.MIE** ← • (غیرفعال کردن وقفه‌ها) ۷. **mstatus.MPP** ← حالت امتیاز فعلی

۶.۲.۳ بازگشت تَرَپ

۱. **PC** ← mepc ۲. **mstatus.MIE** ← mstatus.MPIE (بازیابی فعال‌سازی وقفه) ۳. **حالت امتیاز** ← mstatus.MPP

۶.۳ جدول بردار وقفه

mtvec قرار گرفته در آدرس در (باید ۲۵۶-بایتی تراز باشد).

```
پردازنده  افست
0x000:   پردازنده استثناء همزمان
0x040:   پردازنده وقفه تایمر ماشین
0x080:   پردازنده وقفه خارجی ماشین
0x0C0:   پردازنده وقفه تایمر سرپرست
0x100:   پردازنده وقفه خارجی سرپرست
0x140:   پردازنده وقفه پخش رویداد
0x180:   پردازنده وقفه مانیتور عملکرد
```

۷. معماری امتیازی

۷.۱ سطوح امتیاز

توضیح	نام	کدگذاری	سطح
کد برنامه	کاربر	۰۰	۰
سیستم عامل	سرپرست	۰۱	۱
	(رزرو شده)	۱۰	۲
میان‌افزار، ابرنگهدار	ماشین	۱۱	۳

۷.۲ ثبات‌های کنترل و وضعیت (CSR)

۷.۲.۱ CSRهای سطح ماشین

توضیح	نام	آدرس
ثبات وضعیت ماشین	mstatus	0x300
ISA و پسوندها	misa	0x301
فعال‌سازی وقفه ماشین	mie	0x304
آدرس پایه پردازنده تَرَپ ماشین	mtvec	0x305
ثبات خراش ماشین	mscratch	0x340
PC استثناء ماشین	mepc	0x341
علت تَرَپ ماشین	mcause	0x342
آدرس یا دستور بد ماشین	mtval	0x343
وقفه‌های معلق ماشین	mip	0x344
شمارنده چرخه	mcycle	0x3A0
بیت بالایی شمارنده چرخه ۳۲	mcycleh	0x3B0

۷.۲.۲ CSRهای سطح سرپرست

توضیح	نام	آدرس
وضعیت سرپرست	sstatus	0x100

توضیح	نام	آدرس
فعال‌سازی وقفه سرپرست	sie	0x104
پردازنده تَرَپ سرپرست	stvec	0x105
خراش سرپرست	sscratch	0x140
استثناء سرپرست PC	sepc	0x141
علت تَرَپ سرپرست	scause	0x142
آدرس بد سرپرست	stval	0x143
وقفه‌های معلق سرپرست	sip	0x144
ترجمه آدرس سرپرست	satp	0x180

۷.۲.۳ CSR های ویژه PICAPD

توضیح	نام	آدرس
ماسک دسترسی ثبات رویداد	mevtmask	0x800
پیکربندی ثبات گشتاور	mmoment	0x801
کنترل جریان متن	mcontext	0x802
پیکربندی واحد AGM	magmcfg	0x803
کنترل سطح سلسله‌مراتب	mhierarchy	0x804
پیکربندی امتیاز اعتماد	mtrustcfg	0x805
کنترل مکانیک واریاسیونی	mvariational	0x806
پیکربندی قید ایمنی	msafety	0x807

۷.۳ حفاظت حافظه

۷.۳.۱ حفاظت حافظه فیزیکی (PMP)

دسترسی به نواحی حافظه فیزیکی را کنترل می‌کنند PMP ثبات ۸:

```
pmpcfg0-7:  پیکربندی (R/W/X، حالت، قفل)
pmpaddr0-7: ثبات‌های آدرس (۲۲-بیتی برای فیزیکی ۳۴-بیتی)
```

۷.۳.۲ حافظه مجازی (Sv39)

- **آدرس مجازی ۳۹-بیتی، آدرس فیزیکی ۳۴-بیتی**
- جدول صفحه سه‌سطحی، **اندازه صفحه ۴KB**
- **ASID**: شناسه فضای آدرس ۹-بیتی
- **TLB**: ورودی کاملاً انجمنی-۶۴

۷.۴ حفاظت I/O

- PMP **نگاشت‌شده در حافظه**: حفاظت از طریق **I/O**
- **دستورات مستقیم I/O**: امتیازی (فقط حالت ماشین)
- **DMA**: با جداول صفحه جداگانه IOMMU کنترل از طریق

۸. نحو اسمبلی

۸.۱ نحو دستور

```
<دستور> <مقصد>, <مبدأ۱>, <مبدأ۲>, <مقدار فوری>

مثال‌ها:
  ESET x5, 42          # تنظیم ثبات رویداد ۴۲، ماسک پخش در x5
  MOM.CALC f10, x6, 2  # محاسبه μ₂ از توزیع در [x6]
  AGM.ITER a3, a1, a2  # تکرار AGM: a3 = (a1.a + a2.g)/2, √(a1.a×a2.g
  CONS.CHK x7, m8, m9, 32  # بررسی پایستگی با تحمل ۱۰⁻²
```

۸.۲ قراردادهای نامگذاری ثبات

```
ثبات‌های صحیح:   x0-x31    (x0 صفر سیم‌کشی شده است)
اعشاری:           f0-f31
ثبات‌های رویداد: e0-e511   (آدرس‌پذیر بیتی)
```

```
ثبات‌های گشتاور: m0-m127   (گروه‌بندی شده به صورت m0-m3, m4-m7, ...)
ثبات‌های متن:    c0-c63
ثبات‌های AGM:    a0-a31
ساعت‌های برداری: v0-v15
امتیازهای اعتماد: t0-t255
```

۸.۳ شبه‌دستورات

```
NOP:          ADDI x0, x0, 0
LI rd, imm:   بارگذاری مقدار فوری (تبدیل به LUI + ADDI)
LA rd, symbol: بارگذاری آدرس (نسبی به PC)
MV rd, rs:    ADDI rd, rs, 0
NOT rd, rs:   XORI rd, rs, -1
SEQZ rd, rs:  SLTIU rd, rs, 1
SNEZ rd, rs:  SLTU rd, x0, rs
```

۸.۴ دستورالعمل‌ها

```
.data          تغییر به بخش داده
.text          تغییر به بخش متن
.align n       بایت ۲^n تراز به
.word w1, w2, ...  انتشار واژه‌های ۳۲-بیتی
.dword d1, d2, ... انتشار دوواژه‌های ۶۴-بیتی
.ascii "str"   انتشار رشته ASCII
.asciz "str"   انتشار رشته ASCII پایان‌یافته با صفر
.equ name, value تعریف ثابت
```

ضمیمه الف: مرجع کدگذاری دستور

الف.۱ نقشه کامل کد عملیاتی

کد عملیاتی [6:0]	funct3	دستور	نوع	عملیات
0000011	000	ESET	E	تنظیم ثبات رویداد

عملیات	نوع	دستور	funct3	کد عملیاتی [6:0]
پاک کردن ثبات رویداد	E	ECLEAR	001	0000011
آزمایش حالت رویداد	E	ETEST	010	0000011
انتظار برای رویداد	E	EWAIT	011	0000011
پخش همگانی رویداد	E	EBCAST	100	0000011
محاسبه گشتاور	M	MOM.CALC	000	0001011
فشرده‌سازی گشتاورها	M	MOM.COMP	001	0001011
انتقال گشتاور	M	MOM.XPORT	010	0001011
بررسی تحقق‌پذیری	M	MOM.REAL	011	0001011
تکرار AGM	A	AGM.ITER	000	0010011
انتگرال بیضوی	A	ELI.COMP	001	0010011
انفعال تابع انتقال	A	TXF.PASS	010	0010011
برش متن	C	CTX.SLICE	000	0011011
تجمیع متن	C	CTX.AGG	001	0011011
سنتز متن	C	CTX.SYNTH	010	0011011
ایجاد عامل	H	HIER.SPAWN	000	0100011
خاتمه عامل	H	HIER.TERM	001	0100011
تکامل قابلیت	H	HIER.EVOL	010	0100011
بررسی پایستگی	S	CONS.CHK	000	0101011
بودجه منابع	S	RES.BUDG	001	0101011
اجماع بیزانسی	S	BYZ.CONS	010	0101011
افزونگی مدولار سه‌گانه	S	TMR.VOTE	011	0101011

عملیات	نوع	دستور	funct3	کد عملیاتی [6:0]
عقب‌گرد ایمنی	S	SAFE.ROLL	100	0101011
ارزیابی لاگرانژین	V	LEVAL	000	0111011
گرادیان نسبت به q	V	LGRAD_Q	001	0111011
گرادیان نسبت به q̇	V	LGRAD_V	010	0111011
انتگرال کنش	V	ACTION	011	0111011
انتگرال‌گیری ورلت	V	VERLET	100	0111011
هامیلتونی	V	HAMILT	101	0111011
گرادیان کنش	V	AGRAD	110	0111011
آستانه کنش	V	ATHRESH	111	0111011

الف.۲ کدگذاری فیلدهای مقدار فوری

imm12 (۱۲-بیتی علامت‌دار):

```
بیت‌های ۳۱:۲۰ در دستور
علامت-گسترش‌یافته به ۶۴ بیت برای محاسبات
محدوده: ۲۰۴۷- تا ۲۰۴۷
```

imm5 (۵-بیتی بدون علامت):

```
M-بیت‌های ۱۱:۷ در دستورات نوع
k) برای مرتبه گشتاور) محدوده: ۳۱-۰
```

tol (۷-بیتی تحمل):

```
S-بیت‌های ۶:۰ در دستورات نوع
10 کدگذاری می‌کند {-tol/16}^تحمل را به صورت
tol=0: 10⁻⁰ = 1 (غیرفعال)
tol=32: 10⁻² = 0.01
tol=64: 10⁻⁴ = 0.0001
```

```
tol=96: 10⁻⁶ = 0.000001
tol=127: 10⁻⁷·⁹⁴ ≈ 1.28×10⁻⁸ (سختگیرانه‌ترین)
```

ویرایش ۱.۰ ISA PICAPD پایان مشخصات

این سند معماری کامل قابل مشاهده برنامه‌نویس مجموعه دستورات PICAPD را تعریف می‌کند. قرارداد بین سخت‌افزار و نرم‌افزار را فراهم می‌کند و برنامه‌نویسی اسمبلی صحیح و پیاده‌سازی کامپایلر را بدون ابهام درباره رفتار دستور یا حالت معماری امکان‌پذیر می‌سازد.