KV数据库大作业报告

2021210923 顾掀宇

GitHub - xianyuggg/stupid-kv

总览

环境：Golang1.15，macOS 12.4

特点 & 支持功能

1. 使用Go语言作为整个简易系统实现
2. 支持增删查改(Put/Get/Inc/Dec/Del五种接口)
3. 支持磁盘
   - 目前的实现为将底层数据写入json，因实现有限未能实现增量写入
4. 支持并发
   - 使用锁和并发数据结构保证并发访问，可以支持100+事务启动
5. 支持ACID
   - 分别实现了标准的2PL（Strict 2PL）和简易版的MV2PL
   - 没有支持死锁检测
   - 通过undo log实现回滚
6. 支持MVCC
   - 简易版MV2PL，参考了CMU课程以及课题组论文实现的标准
     - An Empirical Evaluation of In-Memory Multi-Version Concurrency Control
     - https://15721.courses.cs.cmu.edu/spring2019/slides/03-mvcc1.pdf
   - 由于Go语言的限制，在当前实现下很难做到记录级别的锁，锁的粒度实现较粗（对整个版本链加读写锁），没有体现性能优势
   - 因时间有限未能实现GC，因此版本空间是无限递增的

实现细节

总共分为两层，存储层(kv)和事务层(txn)，在2PL实现中为了尽可能地减少耦合，整个存储层对于事务是完全不感知的

存储层

底层存储使用了Golang标准库提供的`sync.Map`的支持并发的结构，对应的value是ValueSlot，为了支持后续mvcc扩展写成了数组的形式，实际上只需要一个value即可。

存储层支持了Put/Get等接口，方便后续上层调用。

存储层提供了Flush接口，把整个Map转化成json存储持久化到文件

```
// Storage Layer
type ValueSlot struct {
    values []base.ValueT
    tids   []base.Tid     // TODO: mvcc implementation
}

type KvManager struct {
    kv         *sync.Map
    flushGuard *sync.Mutex
}
```

事务层（Strict 2PL）

事务层做到了和底层之间的完全解耦，TxnManager字段参考下面的代码，其中lockMap是Key -> sync.RWMutex的映射（因为Golang本身的map不支持并发，所以使用sync.Map），而后每个key使用一个读写锁保护起来，Get的时候加读锁并写入readSet，Put/Del等操作加写锁并写入writeSet。writeSet和readSet是tid -> sync.Map的映射，其中作为value的sync.Map存储了一个tid所写入/访问的key

支持了如下的接口

```go
// Transaction Layer
type TxnManager struct {
    curTid base.Tid

    writeSet *sync.Map
    //writeSet map[base.Tid]map[base.KeyT]int
    readSet *sync.Map
    //readSet map[base.Tid]map[base.KeyT]int
    lockMap *sync.Map
    //lockMap map[base.KeyT]*sync.RWMutex

    guard *sync.Mutex
}

func (m *Manager) acquireWriteLock(key base.KeyT, tid base.Tid)
func (m *Manager) releaseWriteLock(key base.KeyT, tid base.Tid)
func (m *Manager) releaseReadLock(key base.KeyT, tid base.Tid)
func (m *Manager) acquireReadLock(key base.KeyT, tid base.Tid)
func (m *Manager) AllocateNewTid() base.Tid

func (m *Manager) BeginTxn() base.Tid
func (m *Manager) Put(key base.KeyT, value base.ValueT, tid base.Tid) error
// ...
func (m *Manager) CommitTxn(tid base.Tid) error
func (m *Manager) AbortTxn(tid base.Tid) error
```

Categories of Two Phase Locking (Strict, Rigorous & Conservative) - GeeksforGeeks

在Strict 2PL里，整个事务的执行阶段都要不断上锁，并写入readSet和writeSet，在事务commit或者abort阶段访问writeSet，并通过全局的lockMap解锁。

好处在于2PL避免了级联abort，坏处是会出现死锁，由于时间原因没有实现死锁相关的处理

Abort实现

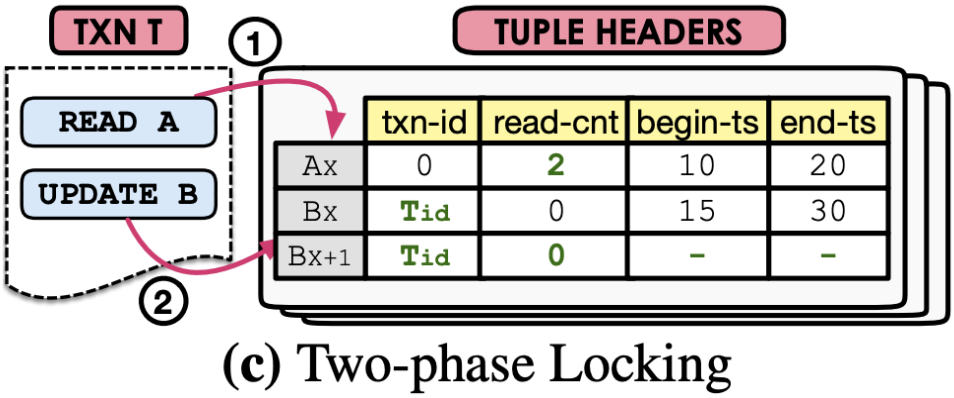
通过记录undolog实现abort，在事务执行阶段，每当有修改操作发生时，记录一下操作的顺序，然后当事务abort时，通过执行一遍相反的操作还原即可。

如下段代码所示，每个UndoLogger有一个tid -> opList的map，记录每个Tid的操作

```
type TxnOp struct {
    op    OpType
    key   base.KeyT
    value base.ValueT
}

type UndoLogger struct {
    txnOps map[base.Tid][]TxnOp
    guard  sync.Mutex
}
```

MV2PL实现



(c) Two-phase Locking

标准的MV2PL里，记录多加4个字段，其中使用read-cnt和txn-id一同实现了共享锁和排它锁

这里应该都是原子变量，由于时间原因我只实现了整个版本链的读写锁，也就是继续沿用前一阶段2PL的做法，维护一个writeSet，可以避免写写冲突，此时需要对于存储层做对应的修改，使用列表的方式维护版本链，记录tidBegin和tidEnd

```
// storage layer
type ValueSlot struct {
    values    []base.ValueT
    tidsBegin []base.Tid
    tidsEnd   []base.Tid // support mvcc
}

type Manager struct {
    //kv map[base.KeyT]ValueSlot
    kv         *sync.Map
    slotGuard  map[base.KeyT]*sync.RWMutex
    mapGuard   *sync.Mutex // used for guarding slotguard (concurrent map
modify)
    flushGuard *sync.Mutex
}
```

以下是各个操作的实现逻辑

- Put/Inc/Dec(key, value, tid)
  - 对于key进行加写锁（避免多个事务同时对于一个变量进行修改）
  - 更改版本链最后的一个记录end-ts为当前tid
    - **如果发现tid < end-ts可以直接报错，之后abort事务（我不太确定这条，姑且列为TODO，之后我再理解一下）**
  - 向版本链后追加一个新记录(key, value, tid, INF)
- Get(key, tid, activeTids []base.Tid)
  - 从版本链最后一个版本进行查找
  - 如果满足begin-ts <= tid <= end-ts
    - 如果tid != begin-ts && activeTids []base.Tid，说明读到了一个还未提交的数据，需要返回一个VALUE_NOT_COMMIT，等待事务提交之后再读
    - 其余情况下可以直接返回当前的值

      TODO：这种方法实现了RepeatableRead，之后等有时间再验证一下
- 其中“读到未提交数据的处理”处理方式如下
  - 使用一个全局的sync.Map记录当前commit的所有事务

    返回VALUE_NOT_COMMIT同时返回一个Tid，然后去不断查找该记录是否已经commit

```
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.010173 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:30: Transaction manager starts to init
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.010467 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 217 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.010479 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/undo.go:34: undo logger starts to init
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.010681 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 218 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.010693 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:145: tid 218: read uncommitted value and wait 217
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.010935 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 219 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.011116 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 220 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.011370 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 221 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.011644 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 222 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.015779 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 217 commit
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.024514 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:148: Txn 218 find 217 find committed in commitTidMap
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.025162 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 223 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.027056 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 221 commit
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.027218 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 224 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.029052 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 219 commit
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.029211 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 225 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.031110 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 222 commit
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.031281 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 226 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.032836 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 220 commit
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.033009 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 227 start
[INFO] 2022/06/25 17:22:47.034383 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 218 commit
```

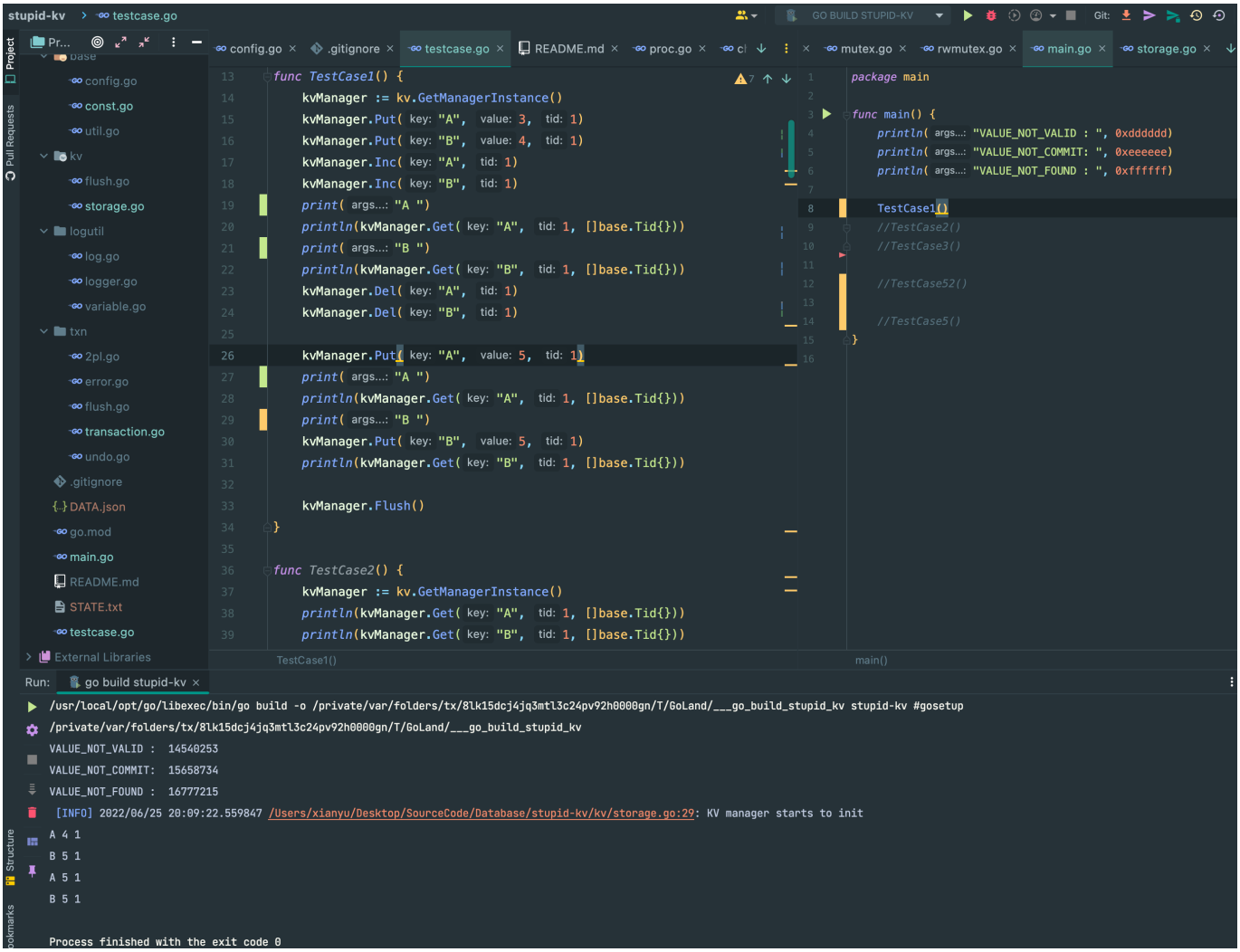
    可以通过日志看到事务可以成功提交

- 等到commit和abort的时候释放写锁

分析

- MVCC本质Writers don't block readers.Readers don't block writers.
- 写写冲突：通过设置写锁来实现，这里实现了简易的key级别的锁
    - **TODO：我暂时未理解事务中写写覆盖的情况锁,暂时通过写锁避免两事务同时修改**
- 读写冲突：可以看到写事务加锁不会影响读事务读数据
- 读读冲突：没有这种情况
- MVCC垃圾回收：
    - 有最简单的基于时间戳的算法，通过一个后台vacuum线程遍历版本链，删除小于当前活跃事务的版本，可以作为Future Work
    - Interval-based method，在复杂的系统里面会用到，实现比较复杂
- Read Uncommitted在实际测试中出现了一种边缘情况
    - 当前执行事务Tid3读取A时发现版本A对应的Tid1没有提交，当前Get失败，并查询commitMap判断Tid1是否提交
    - 当Tid1提交之后，Tid3再次查询A，但是这时发现存在Tid2在这个过程中写入了数据，并且Tid2没有提交
    - 这时Tid3再次查询到了uncommitted data，所以需要再次返回等待Tid2成功写数据
    - 这一过程没有违背任何规则，也确保最终读到了来自Tid2的commited data

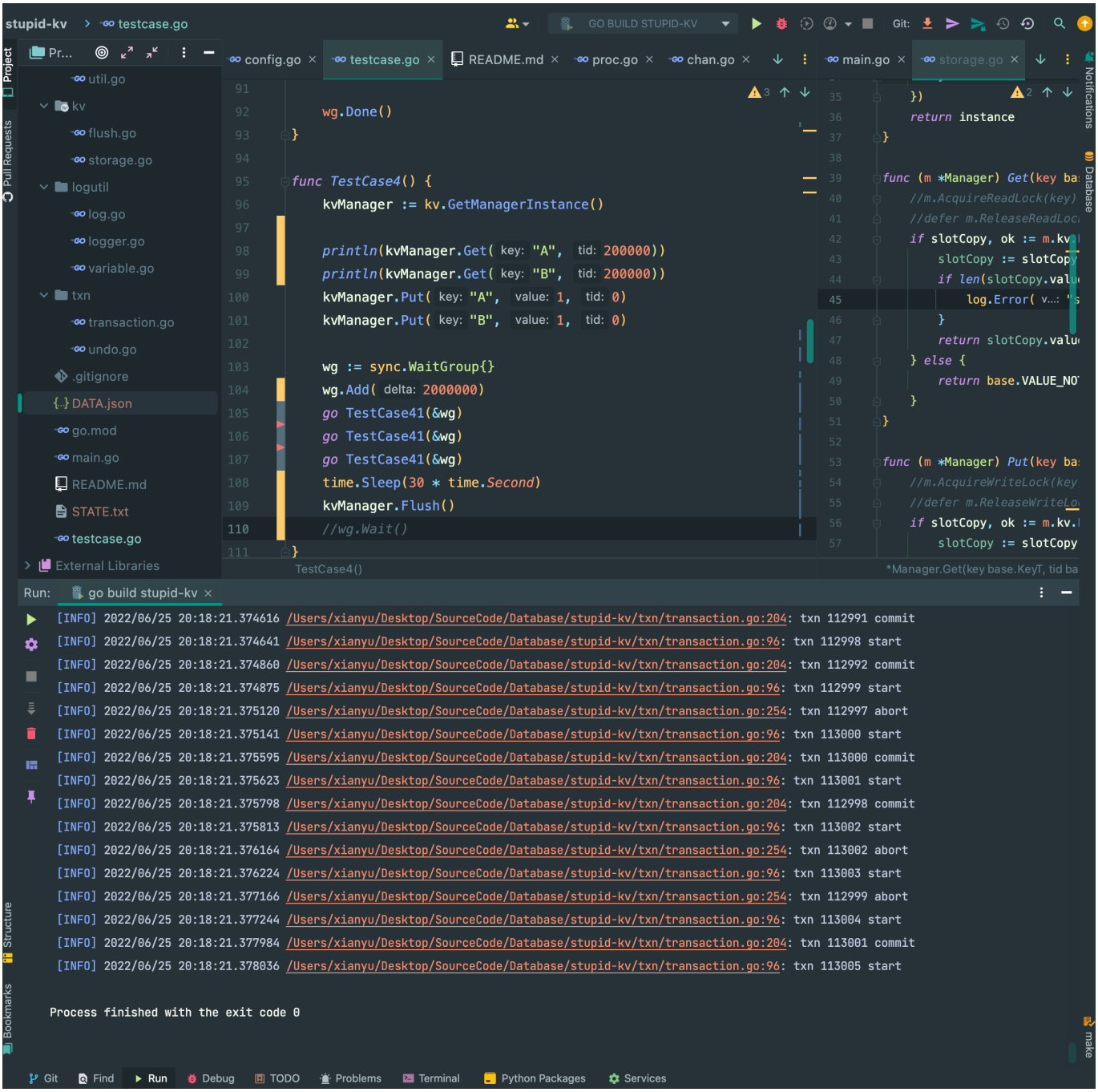
样例测试



测例1～3已经写到testcase.go文件里，可以按预期执行（截图略）

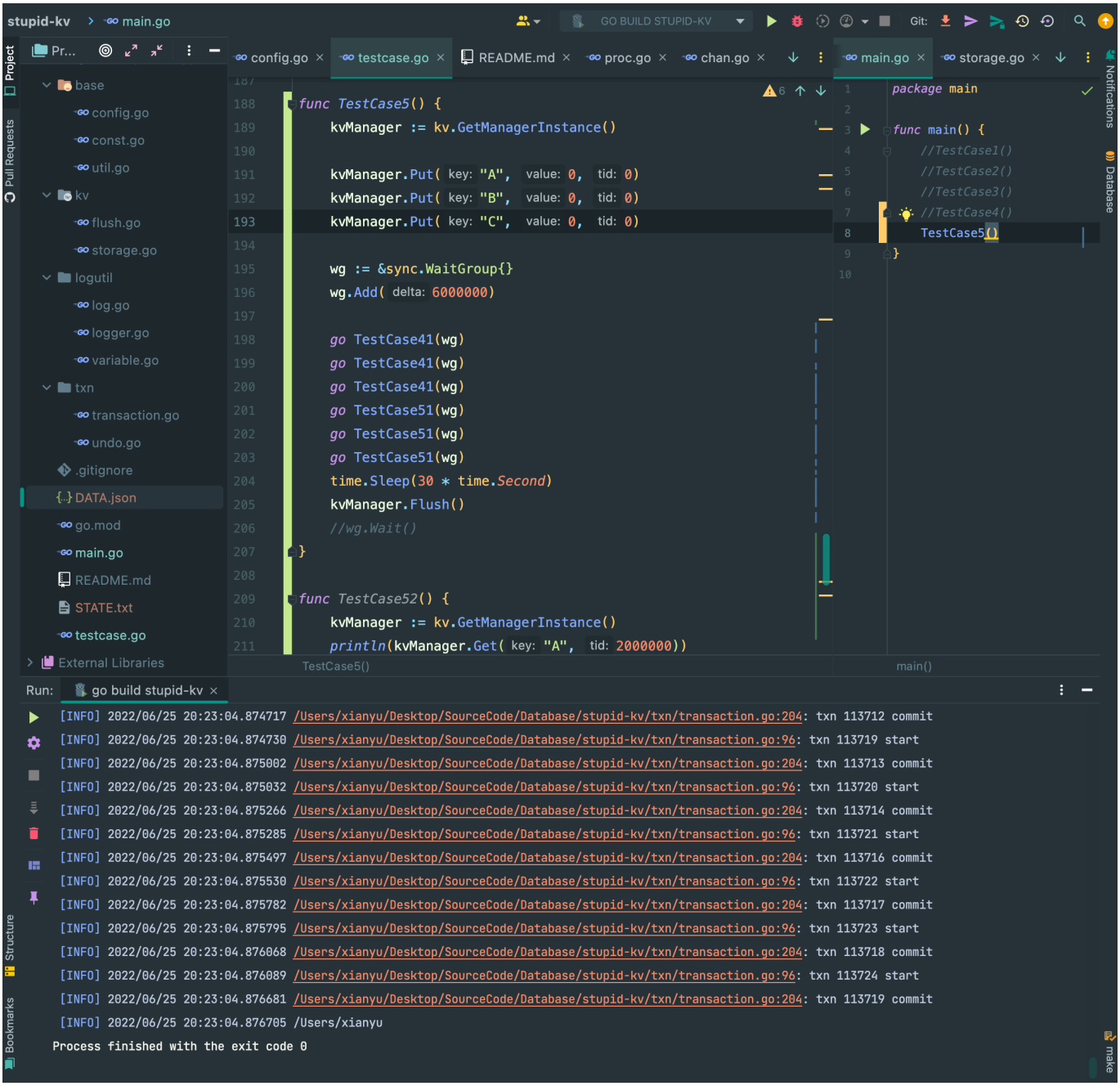
测例4，使用2pl执行，可以看到30s内执行10w+条事务，数据如下

{"A":"376691 113004","B":"376691 113004"}



测例5，30s内执行10w+条事务，数据如下

{"A":"187230 113724","B":"187230 113724","C":"57556 113722"}


stupid-kv
main.go
GO BUILD STUPID-KV
Git:
config.go
testcase.go
README.md
proc.go
chan.go
main.go
storage.go
base
config.go
const.go
util.go
kv
flush.go
storage.go
logutil
log.go
logger.go
variable.go
txn
transaction.go
undo.go
.gitignore
DATA.json
go.mod
main.go
README.md
STATE.txt
testcase.go
External Libraries
func TestCase5() {
kvManager := kv.GetManagerInstance()
kvManager.Put(key: "A", value: 0, tid: 0)
kvManager.Put(key: "B", value: 0, tid: 0)
kvManager.Put(key: "C", value: 0, tid: 0)
wg := &sync.WaitGroup{}
wg.Add(delta: 6000000)
go TestCase41(wg)
go TestCase41(wg)
go TestCase41(wg)
go TestCase51(wg)
go TestCase51(wg)
go TestCase51(wg)
time.Sleep(30 * time.Second)
kvManager.Flush()
//wg.Wait()
}
func TestCase52() {
kvManager := kv.GetManagerInstance()
println(kvManager.Get(key: "A", tid: 2000000))
TestCase5()
main()
package main
func main() {
//TestCase1()
//TestCase2()
//TestCase3()
//TestCase4()
TestCase5()
}
Run:
go build stupid-kv
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.874717 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113712 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.874730 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:96: txn 113719 start
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875002 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113713 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875032 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:96: txn 113720 start
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875266 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113714 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875285 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:96: txn 113721 start
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875497 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113716 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875530 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:96: txn 113722 start
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875782 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113717 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.875795 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:96: txn 113723 start
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.876068 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113718 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.876089 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:96: txn 113724 start
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.876681 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:204: txn 113719 commit
[INFO] 2022/06/25 20:23:04.876705 /Users/xianyu
Process finished with the exit code 0

MVCC测例5测试

```
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.164578 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/kv/storage.go:29: KV manager starts to init
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.165636 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:30: Transaction manager starts to init
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.166053 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 537 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.166070 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/undo.go:34: undo logger starts to init
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.167382 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 538 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.167652 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 542 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.167718 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:145: tid 542: read uncommitted value and wait 538
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.168315 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 540 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.169024 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 539 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.169440 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 541 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.182676 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 537 commit
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.182904 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 543 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.199816 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 538 commit
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.199902 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:148: txn 542 find 538 committed in commitTidMap
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.199923 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:150: tid 542: read uncommitted value and wait 540
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.201151 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 544 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.217463 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 541 commit
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.218568 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 545 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.233824 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 540 commit
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.233929 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:148: txn 542 find 540 committed in commitTidMap
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.233952 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:150: tid 542: read uncommitted value and wait 539
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.235021 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 546 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.246721 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 543 commit
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.247243 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:67: txn 547 start
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.255382 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:86: txn 539 commit
[INFO] 2022/06/25 20:39:36.255420 /Users/xianyu/Desktop/SourceCode/Database/stupid-kv/txn/transaction.go:148: txn 542 find 539 committed in commitTidMap
```

MVCC可以通过测例5简单测试正确性如上，性能因为GC和持久化问题和2pl相比存在差距

存在的问题 & 改进方案

因为时间有限，一些部分只能用粗糙的方法来实现，也会造成一些性能问题，列举如下

- 存储层使用了Map + List的方式存储key和版本链，Golang的List实际上是线程不安全的，在实现MVCC的时候修改List的时候需要对整个List加锁，这样会低效一些
    - TODO：调研并发list的实现，可以考虑提前先分配一个空间，等到需要的时候扩容，让写操作/读操作互不影响
- 持久化的过程比较低效，在一次commit之后将整个map写入的json文件里
    - TODO：调研增量的方法，mmap应该也可以（但是CMU的某篇文章抨击了mmap）
    - 在容忍数据丢失的情况下可以定期刷盘
- Undolog还没有做持久化处理，目前undolog可以用来处理abort
- MV2PL目前实现的锁的级别粒度比较粗
- MVCC过程中遇到了一些事务本身的问题，**在上一节分析里面有写**
    - 如果发现tid < end-ts可以直接报错，之后直接abort事务是否合理

- 如果tid != begin-ts && activeTids []base.Tid，说明读到了一个还未提交的数据，需要返回一个VALUE_NOT_COMMIT，等待事务提交之后重新读，可能会出现读多次的情况
- 需要通过一些测例证明实现了RepeatableRead/Snapshot Isolation